

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA:

INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de: INGENIERO

MECÁNICO

TEMA:

**ANÁLISIS DEL MOVIMIENTO CINEMÁTICO DE UN MOTOR
STIRLING TIPO ALFA APLICADO AL MOTOR DE UNA MOTOCICLETA.**

AUTORES:

HÉCTOR GEOVANNY MANYA YUQUILEMA

CRISTIAN WILSON ORTIZ PINCHAO

DOCENTE TUTOR:

TOMAS IBUJÉS VILLACÍS

Quito, agosto del 2016

Cesión de derechos de autor

Nosotros, Manya Yuquilema Héctor Geovanny, con documento de identificación N° 0604391359, y Ortiz Pinchao Cristian Wilson con documento de identificación N° 1725496168 manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación titulado: Análisis del movimiento cinemático de un motor Stirling tipo alfa aplicado al motor de una motocicleta, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

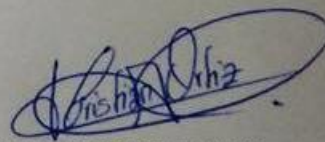
En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



Manya Yuquilema Héctor Geovanny

C.I: 0604391359

Agosto del 2016



Ortiz Pinchao Cristian Wilson

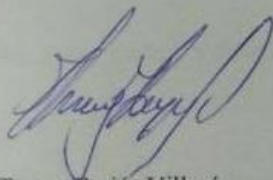
C.I: 1725496168

Agosto del 2016

Declaratoria de coautoría del docente tutor

Yo, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación Análisis del movimiento cinemático de un motor Stirling tipo alfa aplicado al motor de una motocicleta realizado por Manyu Yuquilema Héctor Geovanny y Cristian Wilson Ortiz Pinchao, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, agosto de 2016



Tomas Ibujés Villacís

C.I: 0500904743

Agradecimientos

Al culminar una de mis sueños, mi agradecimiento a Dios como primer y único autor de esta meta.

A mi esposa y mis padres por sus consejos oportunos, y su ayuda incondicional en la obtención de la meta que ellos vieron pertinente para mí.

A la Universidad Politécnica Salesiana y en especial a los docentes por la ayuda brindada al obtener los conocimientos que hoy ya son parte de mi vida cotidiana.

Al docente tutor Tomas Ibujés Villacís, por sus conocimientos brindados, quien fue una guía incondicional e indispensable para la culminación de este trabajo de fin de carrera.

Héctor Geovanny Manya Yuquilema

A Dios a mis padres y familia por su apoyo incondicional al obtener esta meta en mi vida.

A la Universidad Politécnica Salesiana y en especial a los docentes por la ayuda brindada al obtener los conocimientos que hoy ya son parte de mi vida cotidiana.

Al docente tutor Tomas Ibujés Villacís, por sus conocimientos brindados, quien fue una guía incondicional e indispensable para la culminación de este trabajo de fin de carrera.

Cristian Wilson Ortiz Pinchao

Dedicatoria

A Dios, por darme la oportunidad de llegar a este momento único y especial en mi vida, que sin la ayuda de él no podría haberlo obtenido. Por los conocimientos que he aprendido cometiendo muchos errores y pocos aciertos, los triunfos obtenidos y derrotas de las que él me ha ayudado a levantarme.

A mi eterno amor, compañía y esposa Olga.

A mis hermanos que me prestaron su ayuda cuando los necesité.

Héctor Geovanny Manya Yuquilema

A mi familia, porque por sus consejos he aprendido a levantarme después de las caídas y por la perseverancia y tenacidad que ellos me inculcaron.

Cristian Wilson Ortiz Pinchao

Contenido

Introducción	1
Capítulo 1	3
Generalidades del análisis cinemático	3
1.1. Definición de la Cinemática.....	3
1.2. Cadena cinemática	4
Eslabones	5
Juntas o pares cinemáticos	5
1.3. Grados de libertad de un mecanismo	6
Par inferior	6
Par superior	6
1.4. Posición del mecanismo.....	8
1.5. Trayectoria del mecanismo	9
1.6. Velocidad de un eslabón	11
1.6.1. Análisis gráfico de la velocidad	11
1.7. Aceleración de un eslabón	12
Capítulo 2.....	15
Cinemática del motor de combustión interna de la motocicleta	15
2.1. Principio de funcionamiento	15

2.2. Clasificación de motores de motocicleta según la disposición de pistones, para criterio de elección de la motocicleta en el presente proyecto	16
2.2.1. Motores monocilíndricos	16
2.2.2 Motor en línea	17
2.2.3. Motores en v.....	18
2.3. Selección del motor para obtener la cinemática del motor Stirling tipo alfa.	20
2.4. Análisis de la cinemática del motor seleccionado.....	22
2.5. Análisis de posiciones método gráfico.....	22
2.6. Análisis de velocidades del motor de combustión interna método gráfico.....	23
2.7. Análisis de aceleración del motor de combustión interna método gráfico....	26
2.8. Análisis de posición método algebraico del motor de combustión interna de la motocicleta	28
2.9. Programación en Matlab para el análisis de la posición del mecanismo	31
2.10. Análisis de velocidad método algebraico del motor de combustión interna de la motocicleta	34
Velocidad en A (muñón de la biela)	34
Velocidad en B (pistón B).....	38
Velocidad en C (pistón C).....	40
2.11. Análisis algebraico de la aceleración del motor de combustión interna de la motocicleta	41
Aceleración en A (Muñón de la biela)	41

Aceleración en B (pistón B).....	43
Aceleración en C (pistón C).....	45
2.12. Análisis de la presión máxima desarrollada durante la combustión del motor de combustión interna.....	46
Capítulo 3	52
Cinemática del motor Stirling tipo alfa.....	52
3.1. Generalidades del motor Stirling tipo alfa	52
Definición.....	52
Principio de funcionamiento	52
3.2. Análisis de posiciones del motor Stirling.....	53
3.3. Análisis de velocidades del motor Stirling, método gráfico	55
3.4. Análisis de aceleración del motor Stirling método gráfico	57
3.5. Deducción de las ecuaciones generales para el análisis de posiciones del motor Stirling.....	59
3.6. Análisis de posición del motor Stirling tipo alfa.....	61
3.7. Análisis de velocidad del motor Stirling por el método algebraico	64
Velocidad en A (Muñón de la biela)	64
Velocidad en B (pistón B).....	64
Velocidad en C (pistón C).....	64
3.8. Análisis de aceleración del motor Stirling por el método algebraico	66

Aceleración en “A” y “B”	66
Aceleración en C (pistón C).....	66
3.9. Conclusión del capítulo.....	68
Capítulo 4.....	69
Diseño de los elementos del motor de combustión interna en v de 60° para adquirir la cinemática del motor Stirling tipo alfa.....	69
4.1. Modelo matemático para el diseño	73
4.2. Movimiento del pistón – cigüeñal.....	77
4.3. Diseño de elementos constructivos	77
4.3.1. Análisis de esfuerzo y deformación de la manivela para adaptación.....	77
Material utilizado para el diseño de la manivela o eje para adaptación.....	78
Nota: Propiedades del material para cálculo de esfuerzos y deformaciones.	78
Tensión de von mises	78
Desplazamiento	79
Deformación.....	79
Coeficiente de seguridad	80
4.3.2. Pistón.....	80
Nota: Varias aleaciones de aluminio utilizado para la línea de motores	81
4.3.3. Biela	81
Nota: Propiedades de las bielas para cálculo de esfuerzos y deformaciones.	83

4.3.4. Cigüeñal	83
Nota: Varias aleaciones que se puede realizar en los cigüeñales	84
Nota: Propiedades del material de un cigüeñal para cálculo de esfuerzos y deformaciones.	85
4.4. Análisis de resultados.....	86
Capítulo 5	88
Conclusiones y recomendaciones	88
5.1. Conclusiones	88
5.2. Recomendaciones.....	89
Referencias.....	90
Anexos	92

Índice de figuras

Figura 1. Ramas de la mecánica.....	3
Figura 2. (Motor de combustión interna) izquierda, (Esquema cinemático del mismo) derecha.	4
Figura 3. Eslabones de diferente orden	5
Figura 4. Juntas completas con 1 grado de libertad	5
Figura 5. Detalle de un cuerpo rígido en un plano", en un plano de este tipo tiene tres grados de libertad.	7
Figura 6. Mecanismo biela – manivela, se detalla solamente con un solo pistón.....	8
Figura 7. Trayectoria de un mecanismo, cuando el giro del eslabón motriz es anti horario	10
Figura 8. Polígono de aceleraciones de un eslabón cualquiera	13
Figura 9. Motocicleta Honda tornado, habitualmente están equipados con motores mono cilíndricos.....	16
Figura 10. Motocicleta Suzuki Gs 500, con motor en línea, bicilíndrico	17
Figura 11. Motocicleta Kawasaki Z750, con motor en línea de 4 cilindros	18
Figura 12. Motor de combustión interna, con configuración V2	19
Figura 13. Motocicleta Honda VFR con configuración del motor en V2 de 4 cilindros	19
Figura 14. Motocicleta Keeway de 250 cc, escogido para el presente trabajo	20
Figura 15. Posición del mecanismo de motor de motocicleta a 60 grados	23
Figura 16. Cadena cinemática del motor de combustión interna de 60°, a 30 grados en θ_2	24
Figura 17. Triángulo de velocidades para el pistón C, sin escala	25

Figura 18. Triángulo de velocidades para el pistón B, sin escala	26
Figura 19. Aceleración del pistón C, sin escala	27
Figura 20. Aceleraciones del pistón B, sin escala	28
Figura 21. Desplazamiento del pistón y las bielas en una revolución, se ha tomado los datos con un cambio de ángulo de 20 grados.....	34
Figura 22. Velocidad del muñón o manivela en el eje X.	36
Figura 23. Componente de la velocidad de punto A en el eje Y.....	37
Figura 24. Velocidad de A resultante.....	38
Figura 25. Velocidad del pistón B.....	39
Figura 26. Componente de la velocidad de pistón C.	41
Figura 27. Componente de la aceleración de A en el eje x.	42
Figura 28. Componente de la aceleración de A en el eje y	43
Figura 29. Aceleración del pistón B.....	44
Figura 30. Aceleración de C resultante, para una revolución	46
Figura 31. Gráfico del ciclo termodinámico denominado Otto	48
Figura 32. Posición del mecanismo de motor del motor Stirling tipo alfa	53
Figura 33. Detalle de posición del mecanismo del motor Stirling tipo alfa.....	54
Figura 34. Triángulo de velocidades para el pistón C.....	55
Figura 35. Triangulo de velocidades del pistón B.....	56
Figura 36. Aceleración del pistón C.....	57
Figura 37. Aceleración del pistón B.....	59
Figura 38. Desplazamiento del pistón y las bielas del motor Stirling tipo alfa.	63
Figura 39. Velocidad del pistón C.....	65
Figura 40. Aceleración del pistón C.....	67

Figura 41. Modelo matemático de la velocidad del motor Stirling, en el pistón C.	73
Figura 42. Modelo matemático de la aceleración del motor Stirling, en el pistón C....	74
Figura 43. Nueva manivela diseñada para obtener el movimiento del motor Stirling tipo alfa en un motor de combustión interna con configuración en V a 60 grados.....	75
Figura 44. Configuración al diseñar la manivela para un desfase de 30 grados.	76
Figura 45. Vista frontal, lateral y vista isométrica del eje del muñón de la biela con desfase de 30 grados.....	76
Figura 46. Ilustración de las fuerzas que actúan en el conjunto de motor	77
Figura 47. Tensión de Von Mises	78
Figura 48. Desplazamiento de la manivela o eje de adaptación.	79
Figura 49. Deformación equivalente.....	79
Figura 50. Coeficiente de seguridad.....	80
Figura 51. Vista isométrica del pistón, sin escala	81
Figura 52. Vista isométrica y vista frontal de la biela, dibujada a partir de los datos tomados en campo, sin escala.	82
Figura 53. Vista isométrica y vista lateral del cigüeñal, sin escala.....	84
Figura 54. La velocidad con la corrección de 30 grados.....	86
Figura 55. Modelo matemático de la aceleración con la corrección de 30 grados.	86

Índice de tablas

Tabla 1. Dimensiones y capacidades de la motocicleta Keeway 250cc.....	21
Tabla 2. Especificaciones técnicas del motor Keeway 250cc	21
Tabla 3: Variaciones de posición y ángulo de la cadena cinemática del motor de combustión interna a 60 grados.	32
Tabla 4. Variaciones de posición y ángulo de la cadena cinemática del motor Stirling tipo alfa.....	62
Tabla 5. Tabla comparativa del desplazamiento del pistón C del MCI, y el motor Stirling tipo alfa	70
Tabla 6. Propiedades del material utilizado para fabricar la manivela o eje de adaptación.	78
Tabla 7: Aleaciones combinadas en pistones de aluminio de motores	81
Tabla 8: Propiedades mecánicas de los materiales utilizados en las bielas	83
Tabla 9: Propiedades mecánicas de dos materiales muy utilizados en los cigüeñales	84
Tabla 10: Condiciones de operación de los cojinetes y dimensiones	85

Índice de ecuaciones

Ecuación 1	7
Ecuación 2	11
Ecuación 3	11
Ecuación 4	12
Ecuación 5	12
Ecuación 6	12
Ecuación 7	14
Ecuación 8	14
Ecuación 9	29
Ecuación 10	29
Ecuación 11	29
Ecuación 12	30
Ecuación 13	30
Ecuación 14	30
Ecuación 15	30
Ecuación 16	31
Ecuación 17	31
Ecuación 18	31
Ecuación 19	35
Ecuación 20	35
Ecuación 21	35
Ecuación 22	38

Ecuación 23	39
Ecuación 24	40
Ecuación 25	40
Ecuación 26	40
Ecuación 27	41
Ecuación 28	41
Ecuación 29	44
Ecuación 30	44
Ecuación 31	45
Ecuación 32	45
Ecuación 33	46
Ecuación 34	47
Ecuación 35	60
Ecuación 36	60
Ecuación 37	60
Ecuación 38	60
Ecuación 39	61
Ecuación 40	61
Ecuación 41	65
Ecuación 42	65
Ecuación 43	67
Ecuación 44	67

Índice de anexos

Anexo 1. Fotografías de la motocicleta escogida para el presente proyecto	1
Anexo 2. Fotografías del motor de combustión interna con configuración en V a 60 grados	2
Anexo 3. Fotografías de los elementos que conforman el mecanismo biela manivela ..	3
Anexo 4. Fotografías de los elementos que conforman el mecanismo biela manivela (Biela y cigüeñal)	4
Anexo 5. Ficha técnica de la motocicleta KEEWAY	5
Anexo 6. Script realizado en Matlab (DEMO) para análisis de posición del motor de combustión interna. Primera opción.	6
Anexo 7. Script realizado en Matlab (DEMO) para análisis de posición del motor de combustión interna. Segunda opción.	6
Anexo 8. Script realizado en Matlab (DEMO) para análisis de velocidad del motor de combustión interna en el punto “A”	7
Anexo 9. Script realizado en Matlab (DEMO) para análisis de velocidad en el eje X y Y del motor de combustión interna en el punto “B”	8
Anexo 10. Script realizado en Matlab (DEMO) para análisis de velocidad del motor de combustión interna en el punto “C”	9
Anexo 11. Script realizado en Matlab (DEMO) para análisis de aceleración del motor de combustión interna en el punto “A” en el eje X y Y	10
Anexo 12. Script realizado en Matlab (DEMO) para análisis de aceleración del motor de combustión interna en el punto “B” en el eje X y Y	11

Anexo 13. Script realizado en Matlab (DEMO) para análisis de aceleración del motor de combustión interna en el punto “C” en el eje X y Y.	12
Anexo 14. Script realizado en Matlab (DEMO) para análisis de posición del motor Stirling tipo alfa.	13
Anexo 15. Script realizado en Matlab (DEMO) para análisis de velocidad del motor Stirling tipo alfa en el punto “C”	14
Anexo 16. Script realizado en Matlab (DEMO) para análisis de aceleración del motor Stirling tipo alfa en el punto “C”	14
Anexo 17. Script realizado en Working Model (DEMO) del motor Stirling tipo alfa para realizar el análisis cinemático.	15
Anexo 18. Script realizado en Working Model (DEMO) del motor de combustión interna con la compensación realizada para corregir el retraso del pistón C. Para análisis cinemático.	15
Anexo 19. Vista en conjunto del motor de motocicleta con el eje de adaptación diseñado en Inventor profesional (DEMO).....	16
Anexo 20. CD que contiene las simulaciones dinámicas en el programa Inventor profesional (DEMO) y Working model (DEMO).....	19
Anexo 21. Planos	20

Objetivos

Objetivo General:

- Diseñar y simular un mecanismo, para adaptarlo al motor de una motocicleta, consiguiendo con ello la cinemática de un motor Stirling tipo alfa.

Objetivos Específicos:

- Analizar el principio de funcionamiento y la cinemática acerca del motor Stirling tipo alfa.
- Seleccionar y analizar la cinemática y el principio de funcionamiento del motor de combustión interna de la motocicleta V a 60 grados.
- Diseñar el mecanismo y partes necesarias, para adaptarlo al motor de motocicleta, consiguiendo con ello la cinemática de un motor Stirling tipo alfa.
- Simular todos los elementos diseñados de la adaptación del motor de motocicleta, para obtener la cinemática de dicho motor Stirling.
- Analizar la adaptación hacia este motor, para seguir desarrollándolo a futuro, como una alternativa de generación de energía.

Resumen

El presente proyecto se orienta al análisis cinemático de un motor Stirling tipo alfa aplicado a un motor de combustión interna en V a 60° .

Este análisis ayudará a ver la compatibilidad entre el motor Stirling tipo alfa y el motor de combustión interna, con la finalidad de diseñar los elementos necesarios para adaptar ambas cinemáticas.

El proyecto contiene 4 capítulos y se distribuyen de la siguiente manera: el primer capítulo contiene la teoría de la cinemática, la síntesis de mecanismos, grados de libertad, ecuaciones generales de velocidad, aceleración, posición y trayectoria.

En el segundo capítulo se realiza el análisis cinemático del motor de combustión interna, principio de funcionamiento, selección del tipo de motor, selección de la motocicleta para el presente proyecto, análisis cinemático del motor seleccionado por el método gráfico, algebraico, complementado convenientemente con software de análisis matemático como Matlab, Inventor, Working Model para evitar caer en el error.

En el tercer capítulo se estudia el análisis cinemático del motor Stirling tipo alfa: principio de funcionamiento, análisis de la cinemática por el método gráfico, algebraico y complementado al igual que el segundo capítulo con programas de análisis matemático, y se compara con los resultados del capítulo dos para ver las semejanzas y diferencias entre ambas cinemáticas.

En el cuarto capítulo se procede a realizar el diseño de los elementos necesarios para que el motor de combustión interna en v de 60° adquiriera la cinemática del motor Stirling tipo alfa, para realizar el análisis de los resultados obtenidos.

El quinto capítulo contiene las conclusiones y recomendaciones que se ha podido notar en el presente proyecto de titulación, comparando todos los resultados obtenidos y verificando las similitudes y diferencias entre los motores mencionados anteriormente.

Palabra clave: Cinemática, posición, velocidad, aceleraciones, motor de combustión interna, Motor Stirling.

Abstract

Shows a kinematic analysis of the alpha Stirling engine alpha, applied to motorcycle internal combustion engine in V to sixty degrees, has the purpose of this project.

This analysis allows seeing the compatibility between both Stirling and internal combustion engine, determining the compatibility of the two types of engines before mentioned, will be designed with the necessary elements to make both kinematics.

Five chapters is divide this document, as follow:

All issues of kinematics mechanism synthesis: freedom grades, and general equations of velocity, acceleration, and position contains in the first chapter.

Second chapter contains kinematic analysis of internal combustion engine, functioning principles, engine selection, calculated with graphical and algebraic methods, complemented with mathematical analysis software. Therefore the use of software such as: Matlab, Autodesk Inventor Professional 2016 and Working Model is essential.

Third chapter deals with kinematic analysis of alpha Stirling engine, functioning principles, calculated with graphical and algebraic methods and complemented as second chapter with mathematical analysis programs to comparison with second chapter results.

The kinematic analysis of the alpha Stirling engine is shown in the chapter three, it develops the principle of operation, analysis, graphical and algebraic methods.

In the fourth chapter, the design of the elements appears, so that the engine of internal combustion in V to sixty grades acquires the kinematics of the engine Stirling. Besides it presents the calculations of efforts and deformations.

Finally in the fifth chapter the conclusion and recommendations of this work are presented.

Keywords: Velocity, acceleration, position, kinematic, internal combustion engine, alpha Stirling engine.

Introducción

Durante el desarrollo de la tecnología se inventaron motores altamente eficientes, uno de esto fue el motor Stirling que además usa el ciclo termodinámico Stirling considerado uno de los más eficientes. Este motor fue desarrollado en 1816 por el reverendo Robert Stirling que consideraba que en la máquina de vapor era muy complicada de controlar el calentamiento del agua para luego condensarlo, era una concepción muy anticuada para él.

El problema con el motor Stirling radicaba en las altas temperaturas a la que funcionaba el motor sobre los 650° Celsius, pero con el paso del tiempo se ha logrado fabricar materiales que pueden soportar estas temperatura, otra desventaja fue el método de refrigeración, esto se soluciona en un motor tipo alfa incorporando el regenerador, también fue la hermeticidad entre el pistón y el cilindro por la fugas que presentaba el fluido de trabajo en los pistones, ya que al ajustar los aumentaba la fricción y al disminuir el diámetro del pistón se presentaban fugas por las presiones de hasta 15 bares que maneja este motor, pero este problema de hermeticidad vs. Fricción está solucionado en un motor tradicional de combustión interna. (Rodríguez Sánchez, 2011, pág. 54).

La falta de estudio cinemático en estos motores no deja de ser un problema a la hora de realizar un estudio más profundo sobre las variables de velocidad, aceleración y trayectoria, del motor de una motocicleta en V a 60° y mucho menos de un motor Stirling tipo alfa. Y no se han hecho avances en este sentido al menos en Ecuador y no se tiene mucha información sobre la cinemática del movimiento.

Observando el motor de combustión interna se nota que el motor de la motocicleta en V a 60° es muy similar al motor Stirling tipo alfa, porque contiene dos pistones desfasados uno respecto a otro, el mismo mecanismo, pero con el problema que son el uno están desfasados en 30 grados ya que el motor Stirling tiene sus pistones desfasados a 90 grados.

Con este argumento se hace factible el análisis cinemático del motor de una motocicleta para diseño de uno o varios elementos necesarios para obtener el movimiento cinemático de un motor Stirling tipo alfa, que será el punto de partida para el este proyecto.

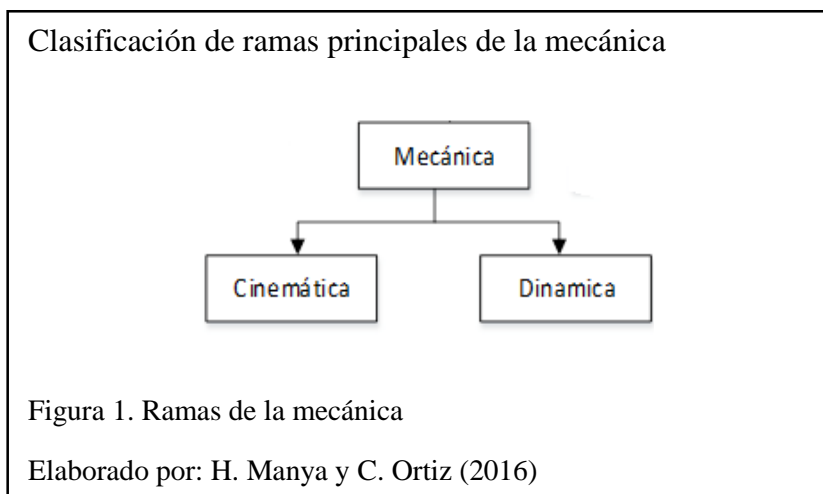
Capítulo 1

Generalidades del análisis cinemático

En el presente capítulo se estudiará el marco teórico de la cinemática, el mecanismo biela – manivela, la síntesis de mecanismos para formular leyes generales que ayuden al análisis cinemático de los motores a estudiarse más adelante.

1.1. Definición de la Cinemática

Para un mejor entendimiento del término cinemática, se definirá a la mecánica como una parte fundamental de la física que se encarga del estudio del movimiento de un cuerpo, las causas que lo generan y a partir de este principio formular las leyes que rigen dicho movimiento. Para un mejor análisis de la mecánica, esta se divide en 2 partes, como se muestra en la Figura 1.



En diseño, la cinemática es la parte de la mecánica que analiza el movimiento relativo de un mecanismo sin considerar las causas que la provocan.

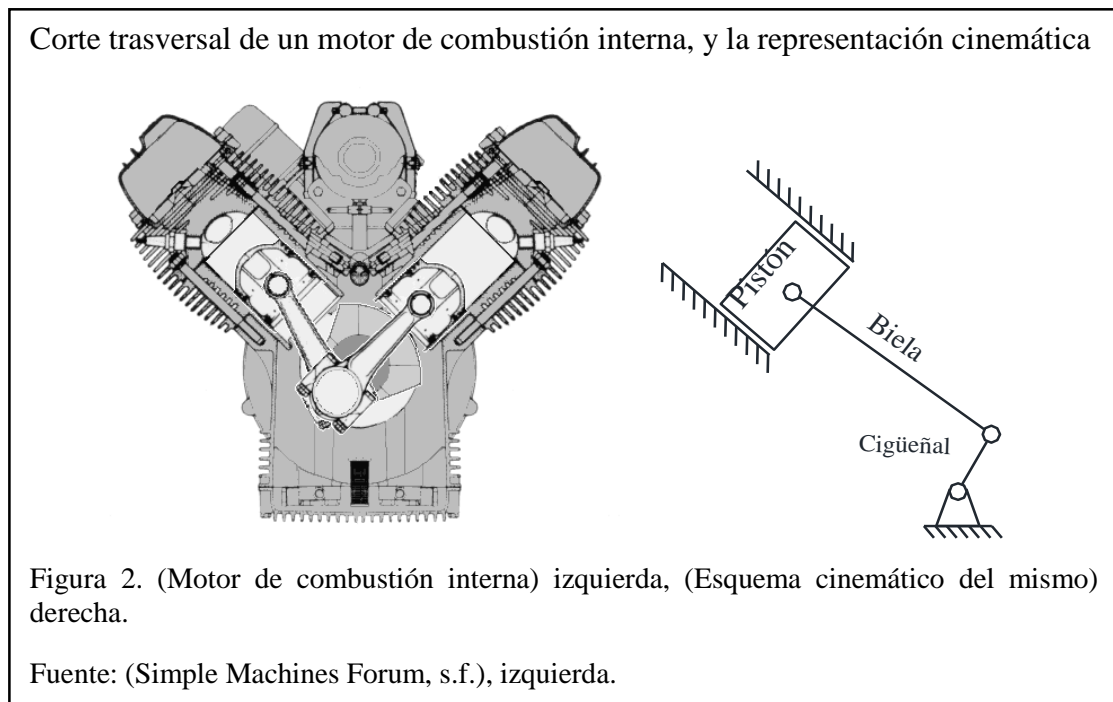
Los elementos de estudio de la cinemática son, el espacio (x, y, z), el tiempo (t), y el cuerpo.

1.2. Cadena cinemática

Para realizar un estudio adecuado nunca hay que representar a las partes del mecanismo en su totalidad, con sus formas, partes y dimensiones. Por lo tanto hay que realizar un esquema cinemático, en el que se indique los eslabones, juntas y pares del mecanismo, para así obtener una mejor comprensión.

Identificar el diagrama cinemático de un motor de combustión interna en una fotografía o imagen completa, puede llegar a ser difícil.

El mecanismo que se va a estudiar es el mecanismo biela – manivela, ya que este mecanismo es el que ha sido utilizado durante muchos años en los motores de combustión interna y también es utilizado por el motor Stirling, este es un mecanismo muy confiable, teniendo como ventaja su sencillez en la construcción y una larga vida de funcionamiento.

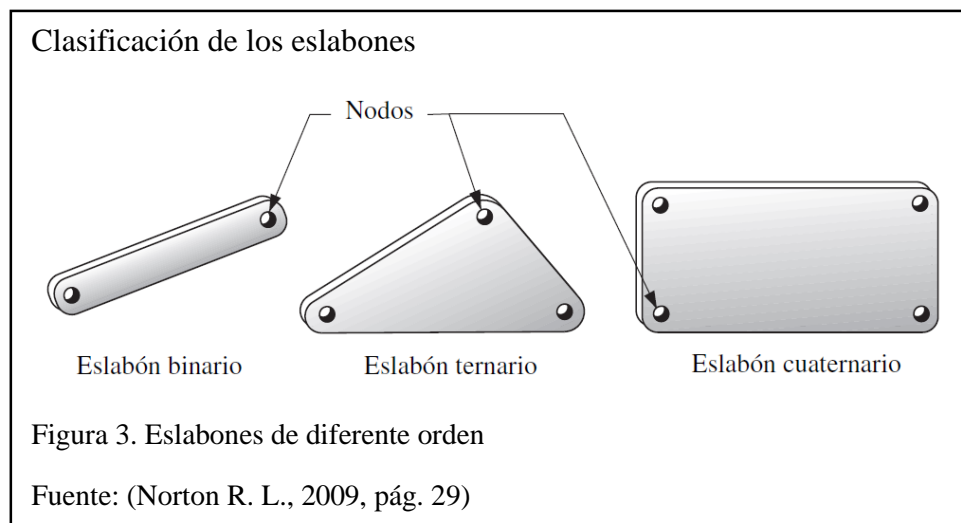


En la Figura 2 se puede observar el motor combustión interna en V y su representación en el esquema cinemático.

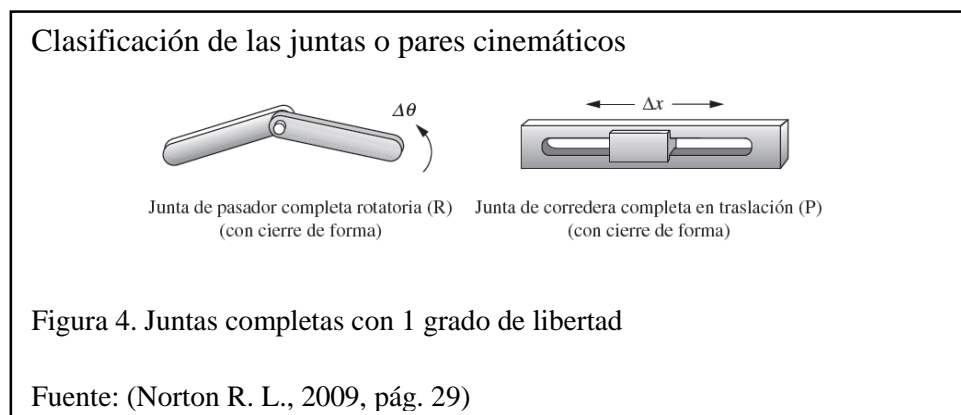
Para estudiar la cinemática del mecanismo biela – manivela es necesario definir los términos de eslabones y juntas.

Eslabones

Son bloques de construcción básicos de los mecanismos que poseen por lo menos dos nodos que son puntos de unión con otros eslabones, Figura 3. (Norton R. L., 2009, pág. 29)



Juntas o pares cinemáticos



Es una conexión entre dos o más eslabones (en sus nodos), la cual permite algún movimiento, o movimiento potencial, entre los eslabones conectados, por lo extenso de la clasificación de las juntas solo se ha citado una de ellas, Figura 4. (Norton R. L., 2009, pág. 29)

1.3. Grados de libertad de un mecanismo

Al realizar un análisis de cualquier tipo de mecanismo se tiene como primera preocupación estudiar los grados de libertad, ya que esto nos ayudará a saber si un mecanismo tiene movilidad o en su efecto no la tiene, y si tiene movilidad cuantos tipos movimientos tiene.

Para encontrar los grados de libertad de un mecanismo se debe conocer el número de eslabones y el número de pares cinemáticos que existe en un mecanismo. Hay que tomar muy en cuenta el tipo de par cinemático, porque se puede tener pares superiores o inferiores.

Par inferior

Es aquel que los eslabones tienen contacto superficial, estos pueden ser de traslación o rotación.

Par superior

Es aquel que los eslabones tienen contacto en un punto o línea, estos soportan menos esfuerzos que los inferiores.

Una vez realizado este recuento se puede encontrar los grados de libertad con la ayuda de la Ecuación 1, de Gruebler,

$$W = 3(n - 1) - 2p - k$$

Ecuación 1

Donde:

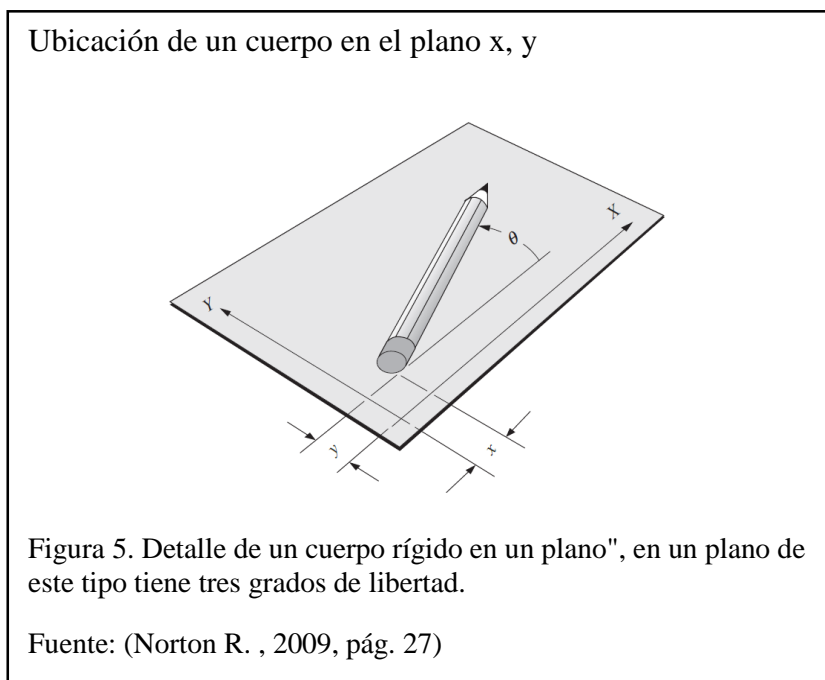
W : Grados de libertad.

N : Número total de eslabones del mecanismo.

P : Número de uniones del mecanismo (par inferior).

K : Número de pares superiores (engranes, levas, etc.).

En el libro de diseño de máquinas, W de un sistema es igual al número de mediciones que se requieren para definir de manera única su posición en el espacio en cualquier instante de tiempo o también como el número de movimientos necesarios que operen un mecanismo, esto puede ser mover un eslabón manualmente o por medio de un motor. Hay que observar que W se define con respecto a un plano de referencia que el estudiante toma convenientemente para el análisis del mecanismo. (Norton R. L., 2009, pág. 27)

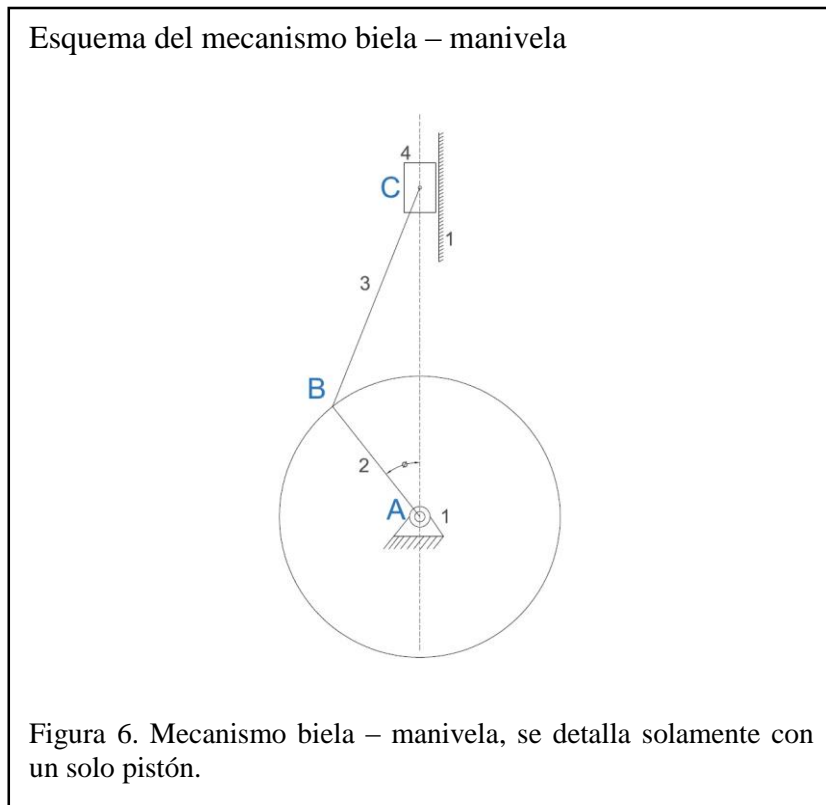


Como muestra la Figura 5, para restringir el cuerpo rígido en el plano X, Y , se requiere de tres mediciones que deberíamos conocer, el ángulo (θ), la distancia x , y la distancia y , por esta razón se concluye que esta Figura tiene 3 W.

Si quisiéramos hacer esto en un plano tridimensional tendría 6 W, porque cualquier cuerpo rígido en un plano de 3 dimensiones tiene 6 W.

1.4. Posición del mecanismo

La posición de un objeto se puede describir por medio de un vector posición, que se dibuja desde el origen de un sistema de referencia hasta la ubicación de la partícula. El análisis directo de posición consiste en determinar las coordenadas, y ángulos de referencia de los eslabones de los mecanismos, a partir de la posición de uno de ellos. (Sanchez Sanchez, 2008, pág. 2). Como se observa en la Figura 6.



En el método gráfico para calcular el desplazamiento de los eslabones B y C se supone conocer el ángulo de entrada (θ), como la posición inicial. Al dibujar el mecanismo a escala, y conocer el ángulo de entrada (θ), queda definido la posición de cada uno de los puntos del mecanismo. Después se sitúa las posiciones de los eslabones 3 y 4 para cada posición de la manivela 2 en función de su ángulo de entrada (θ), con ello se obtendrá las diferentes trayectorias de cada punto del mecanismo.

Aunque el análisis de la posición por medio del método gráfico como se muestra en la Figura 6 es sencillo y práctico, solamente se puede analizar una posición a la vez con un ángulo determinado, ya que todas las variables en la siguiente posición serán totalmente diferentes, dando un resultado independiente para cada posición. Entonces el análisis por método gráfico resulta ser un método que no tiene trascendencia en el análisis ingenieril de un mecanismo.

En cambio desarrollando el análisis de posiciones por el método algebraico se formula una Ecuación general que calcule las variables para cualquier posición, y con la ayuda de software de análisis matemático, una vez que se deduzca las ecuaciones generales del movimiento para un mecanismo en particular se puede resolver con rapidez todas las posiciones. Durante el desarrollo de nuestro proyecto, se analizará la posición por el método gráfico en 3 posiciones como una formalidad, y una Ecuación general para un cálculo más exhaustivo del mecanismo.

1.5. Trayectoria del mecanismo

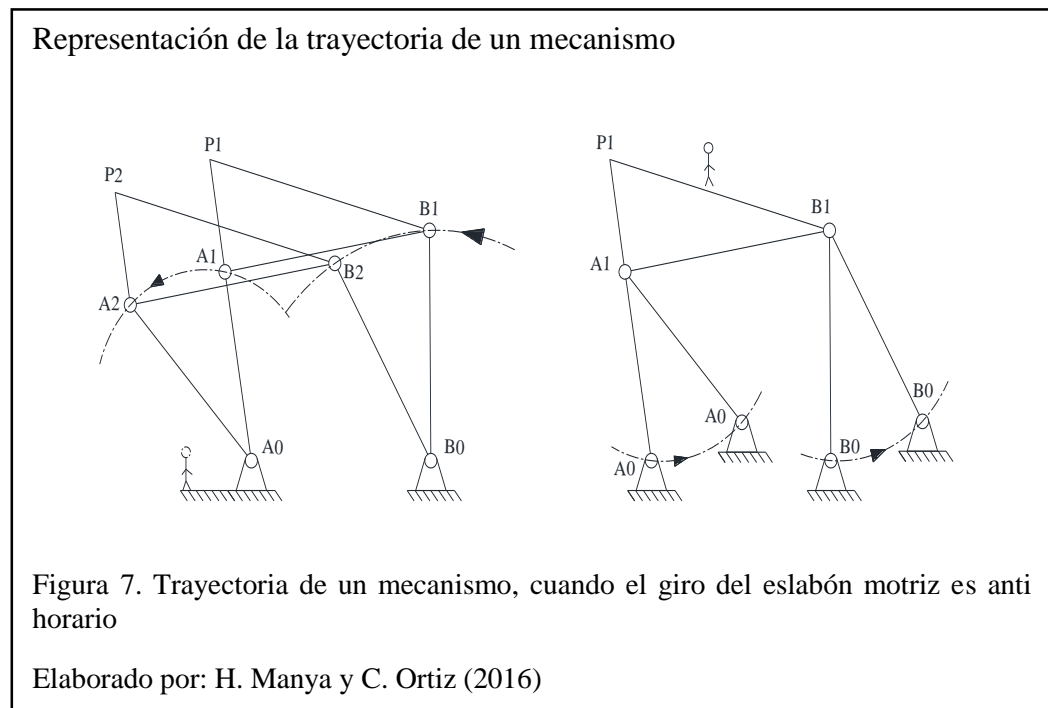
Se denomina generación de trayectorias a la parte de la síntesis de mecanismos que estudia el movimiento de los elementos de un cuerpo pertenecientes

a un mecanismo en una unidad de tiempo que generalmente tiende a cero. Al realizar las trayectorias de un mecanismo podemos encontrar ciertos problemas o dificultades como son: generar trayectorias iguales o generar trayectorias simétricas.

Para trazar la trayectoria de un mecanismo cuadrilátero articulado será distinto dependiendo cual sea el eslabón fijo o dependiendo cual sea la posición del observador.

Si este se encontrara en el bastidor las articulaciones o eslabones flotantes recorren una trayectoria circular alrededor del eslabón fijo. Si está situado en el acoplador serán los eslabones fijos los cuales describan una trayectoria circular alrededor de los eslabones móviles.

En la Figura 7 se puede observar la trayectoria de un mecanismo de 4 eslabones articulados cuando el movimiento se realiza en sentido anti horario.



1.6. Velocidad de un eslabón

Se define a la velocidad como la tasa de cambio de posición con respecto al tiempo. La posición x es una cantidad vectorial como la velocidad. Y puede ser descrita como velocidad angular (w) o lineal (V), según su trayectoria. (Norton R. , 2009, pág. 245)

$$w = \frac{d\theta}{dt} \quad \text{Ecuación 2}$$

$$V = \frac{dx}{dt} \quad \text{Ecuación 3}$$

El cálculo de la velocidad es de vital importancia, ya que una vez que se define la posición se debe calcular las velocidades en todo el mecanismo, tanto para calcular la energía cinética almacenada, como para determinar las aceleraciones de los eslabones que se requieren para calcular la fuerza dinámica al cual es sometido el mecanismo o maquinaria (Norton R. , 2009, pág. 245). Para un mayor entendimiento de la velocidad se la puede calcular de diferentes maneras, ejemplo de esto es el análisis de velocidad en forma gráfica y a través del método algebraico.

1.6.1. Análisis gráfico de la velocidad

Es uno de los métodos más comunes en el cálculo de la velocidad de un mecanismo, por su forma práctica en la resolución de problemas de análisis de velocidad, por la comprobación rápida que se puede hacer de un problema resuelto y porque da al ingeniero una retroalimentación visual de la solución en cuestión. Con las herramientas adecuadas, y en los últimos tiempos con la ayuda de programas CAD es posible encontrar velocidades precisas en un punto particular durante la

trayectoria. Esto a su vez es una desventaja, ya que para conocer la velocidad en forma detallada sería necesario realizar diagramas para cada cambio de posición.

Para el análisis en forma gráfica se plantea, el método de las velocidades relativas que se define con la siguiente Ecuación.

$$V_B = V_A + V_{B/A} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

V_A : Velocidad de A

V_B : Velocidad de B

$V_{B/A}$: Velocidad de B respecto a A.

En la Figura 8, se ha realizado el análisis de velocidades, razón por el cual se supone que se conoce las velocidades en los puntos A y B, y la velocidad relativa $\overrightarrow{V_{BA}}$, por lo tanto definimos a la velocidad angular con la Ecuación 2.

1.7. Aceleración de un eslabón

La aceleración instantánea, de aquí en adelante conocida solamente como aceleración, al igual que la velocidad puede ser angular (ω) o lineal (V). Y se define como la variación de velocidad en una unidad de tiempo. O también como la tasa de cambio de velocidad con respecto al tiempo. Cuya expresión es la siguiente:

$$d\alpha = \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad \text{Ecuación 5}$$

Y la Ecuación:

$$da = \frac{d^2x}{dt^2} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

α : Aceleración angular

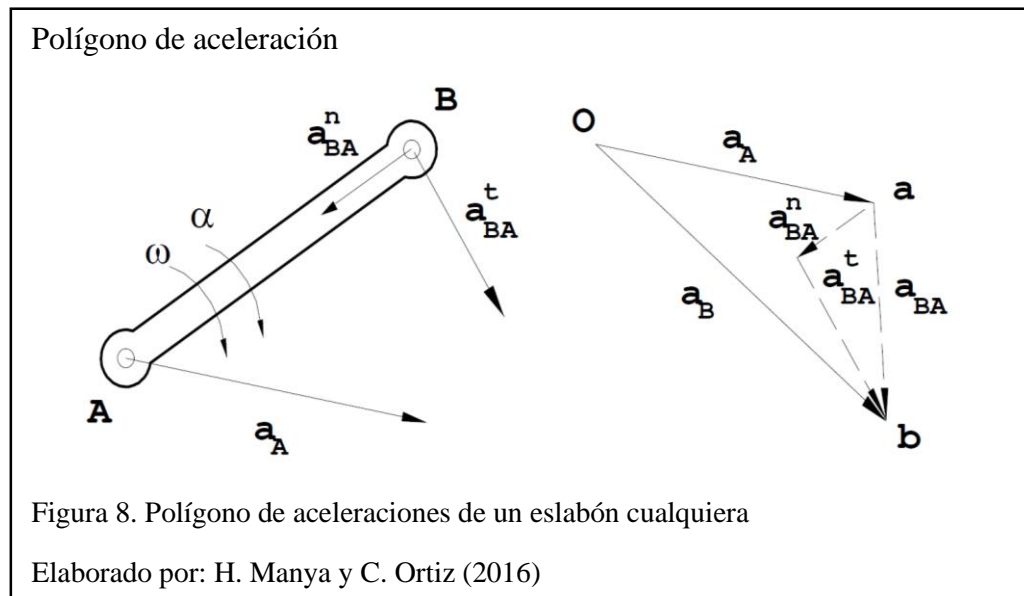
a : Aceleración tangencial

t : Tiempo

θ : Desplazamiento angular

x : Variación de posición lineal

Para analizar la aceleración gráficamente, se utiliza el método de las aceleraciones relativas, cuyo procedimiento es similar a las velocidades relativas, ya que en ambos casos son sumas vectoriales de aceleración y velocidad respectivamente, como se muestra en la Figura 8.



Como se conoce la aceleración angular del eslabón y la aceleración del punto A, se calcula la aceleración en el punto B por el mencionado método de aceleraciones relativas. Esto se expresa en la Ecuación 7.

$$\overrightarrow{a_B} = \overrightarrow{a_A} + \overrightarrow{a_{BA}} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

$\overrightarrow{a_B}$: Aceleración de B.

$\overrightarrow{a_A}$: Aceleración de A.

$\overrightarrow{a_{BA}}$: Aceleración de B con respecto a A.

Al descomponer la Ecuación 7, en sus componentes tangencial y normal, se tiene la Ecuación 8 que se detalla a continuación.

$$\overrightarrow{a_{BA}} = \overrightarrow{a_{BA}^n} + \overrightarrow{a_{BA}^t} \quad \text{Ecuación 8}$$

$\overrightarrow{a_{BA}^n}$: Aceleración normal de B con respecto a A.

$\overrightarrow{a_{BA}^t}$: Aceleración tangencial de B con respecto a A.

Al realizar el estudio de los conceptos básico de la cinemática y síntesis de mecanismo se puede proceder a realizar el cálculo de las diferentes variables, deducidas en este capítulo. Estas ecuaciones serán sumamente importantes para hallar la cinemática del motor de combustión interna de la motocicleta y la del motor Stirling tipo alfa.

Capítulo 2

Cinemática del motor de combustión interna de la motocicleta

En el presente capítulo se busca conocer el principio de funcionamiento del motor de combustión interna de una motocicleta y analizar la cinemática de su mecanismo. Se aplicará los fundamentos de análisis cinemático desarrollado en el Capítulo 1. Se analizará los diferentes modelos de motores de combustión interna de motocicletas, para seleccionar el motor más adecuado para el presente proyecto.

Con los resultados obtenidos con el análisis cinemático del motor de combustión interna se sabrá si el motor de la motocicleta que se seleccione puede adquirir el movimiento del motor Stirling tipo alfa.

2.1. Principio de funcionamiento

Es una máquina que transforma la energía calórica de sustancias inflamables a energía mecánica, por la reacción exotérmica que sucede en una cámara cerrada denominada cámara de combustión. Los motores de combustión interna de motocicleta difieren por la cilindrada, el número de cilindros, la disposición, potencia, y su tipo de ciclo termodinámico como son los de 2 y 4 tiempos.

Funciona a través de la combustión de la mezcla aire – combustible en la cámara de combustión también llamado cilindro, logrando una presión que genera el movimiento lineal alternativo del pistón y que por medio de la biela y el cigüeñal unidos por piezas móviles transforma el movimiento lineal en movimiento rotativo.

El motor de 4 tiempos llega generar hasta 120 explosiones por segundo, perfectamente sincronizados en 4 fases.

2.2. Clasificación de motores de motocicleta según la disposición de pistones, para criterio de elección de la motocicleta en el presente proyecto

Los motores más utilizados en las motocicletas son los monocilíndricos y bicilíndricos, estas se encuentran configuradas de diferentes formas logrando así diferentes rendimientos.

2.2.1. Motores monocilíndricos

Los motores mono cilíndricos pueden ser verticales u horizontales, este tipo de motor fueron muy populares en las motocicletas, en la década de los 90's, llegando a ser sustituidos por motores más eficientes a comienzos del 2000, el ciclo de funcionamiento del motor fue de 2 tiempos, una de las mayores desventajas era la relación de tamaño y contaminación, con cilindradas que iban desde los 50cc a 200cc.

Honda Tornado



Figura 9. Motocicleta Honda tornado, habitualmente están equipados con motores mono cilíndricos

Fuente: (Honda Motor Argentina, 2011)

Los motores mono cilíndricos vertical iban desde 80 a 650 cc, este tipo de motor fue utilizado cuando no son necesarias las prestaciones de potencia, eficiencia, par motor, por las facilidades que representa el mantenimiento, son económicos, y

sencillos de construir. Uno de los motores más populares con este tipo de motor fue el Honda Tornado, Figura 9.

2.2.2 Motor en línea

Los motores en línea pueden ser de dos o más cilindros. Son utilizados en motocicletas de cilindraje alto, similar al motor bicilíndrico en v. El motor en línea es un motor de combustión interna, cuya configuración de cilindros, o pistones son en forma paralela, es decir en una sola fila. Son muy utilizados en las motocicletas por las facilidades que presenta en el diseño y construcción frente a su similar motor en v. En la Figura 10 se puede observar una motocicleta que contiene estas características.



Al igual que el motor en v, el motor en línea tiene motor de 4 cilindros alineados, las motocicletas deportivas son las que más utilizan este tipo de motor.

Una de las motocicletas más representativas con este tipo de motor es el Kawasaki Z750, Figura 11.



2.2.3. Motores en v

Estos motores también son conocidos como motor bicilíndrico en v, Figura 12, son motores de combustión interna cuya configuración de pistones están repartidos en dos bloques unidos por la base o la bancada, los cuales convergen en el mismo cigüeñal. Según la historia, los primeros motores en v fueron construidos en 1889, como plantas fijas de poder para barcos.

Generalmente se conoce como motor en v a un motor mayor a un cilindro cuyo ángulo es mayor a 0° y menor 180° , aunque los más utilizados son los de 45° , 60° y 90° , este tipo de motor son muy populares en motores como las Harley Davidson, Suzuki Vstorm 650, Honda, etc. Cuentan con sistemas de refrigeración por aire, y líquido refrigerante.

También se han desarrollado motores en v de 4 cilindros, aunque en la actualidad el uso de este tipo de motor es muy limitado, porque las ventajas que da los motores en línea de 4 cilindros son mayores que el motor en v de 4 cilindros, sin embargo algunas marcas como honda si la utilizan.

Motor de combustión interna, MCI.

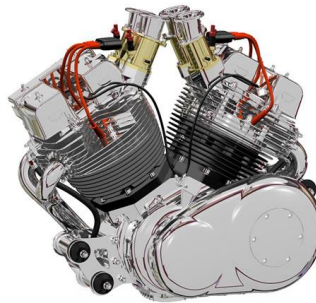


Figura 12. Motor de combustión interna, con configuración V2

Fuente: (Crowe Computer Services, 2015)

Un ejemplo de este tipo de motor es el honda VFR, Figura 13.

Honda VFR



Figura 13. Motocicleta Honda VFR con configuración del motor en V2 de 4 cilindros

Fuente: (Honda "The power of dreams", 2016)

2.3. Selección del motor para obtener la cinemática del motor Stirling tipo alfa.

Para el proyecto se ha seleccionado el motor de motocicleta en V a 60°, de la marca MOTOR UNO KEWAY 250cc, porque el nivel de desarrollo en este tipo de motor es muy elevado, es fácil de encontrar en el mercado nacional y para nuestro proyecto es de interés más general que otro tipo de motores mencionados anteriormente.

La principal ventaja del motor V frente al motor en línea de un mismo número de cilindros es su tamaño más compacto, una mayor rigidez y mecanismo similar al motor Stirling tipo alfa. Llegando a ser hasta un 50% menor en longitud de un motor en línea, pero un poco más ancho, siempre que se diseñe para acomodar las bielas en un mismo muñón de cigüeñal. Entonces los cilindros de los bancos opuestos, comparten el mismo muñón del cigüeñal. (Norton R. L., 2009, pág. 634)

Motocicleta Keeway 250cc



Figura 14. Motocicleta Keeway de 250 cc, escogido para el presente trabajo

Fuente: (Motoscoting Web S.L, 2016) izquierda.

Elaborado por: H. Manya y C. Ortiz (2016)

Es importante conocer la capacidades del motor seleccionado para asegurarse de que la selección es la correcta, razón por la cual se ha elaborado las tablas 1 y 2, como complemento de los desarrollado en la sección de clasificación de motores.

Tabla 1. Dimensiones y capacidades de la motocicleta Keeway 250cc.

DIMENSIONES	MAGNITUD
Longitud Total	2280 mm
Anchura Total	900 mm
Altura Total	1110 mm
Distancia entre ejes	1530 mm
Peso	170 kg
Capacidad depósito de combustible	13,5 lt.

Nota: Dimensiones de referencia para la motocicleta Keeway

Fuente: (Keeway Motor, 2011)

Tabla 2. Especificaciones técnicas del motor Keeway 250cc

CARACTERISTICAS	MAGNITUD
Desplazamiento	250 cc / 4 tiempos
Disposición de cigüeñales	V2 / 60°
Diámetro y carrera cilindro	49 mm X 66 mm
Relación de compresión	9,4: 1
Potencia Máxima	19 HP / 1800 RPM
Torque Máximo	18,7 Nm / 5750 RPM
Caja de cambios	5 Velocidades

Nota: Dimensiones y capacidades de referencia para el motor de la motocicleta Keeway

Fuente: (Keeway Motor, 2011)

2.4. Análisis de la cinemática del motor seleccionado

Para el estudio de la cinemática tomaremos las medidas del motor original mencionado en las tablas 1 y 2.

Las dimensiones de la biela, cigüeñal, pistón, se especifica en la Figura 15. Estos datos serán utilizados en todos los cálculos que se realizara posteriormente.

2.5. Análisis de posiciones método gráfico

Se define la posición y características del mecanismo en la Figura 15, esta posición se ha elegido al azar, para el cálculo correspondiente de los grados de libertad, posición, trayectoria, velocidades y aceleraciones.

Con las medidas de los eslabones tomadas a la motocicleta en el taller (Anexo 1 y 2) que son:

$$OA = 0.033 \text{ m}$$

$$AB = 0.122 \text{ m}$$

$$BC = 0.122 \text{ m}$$

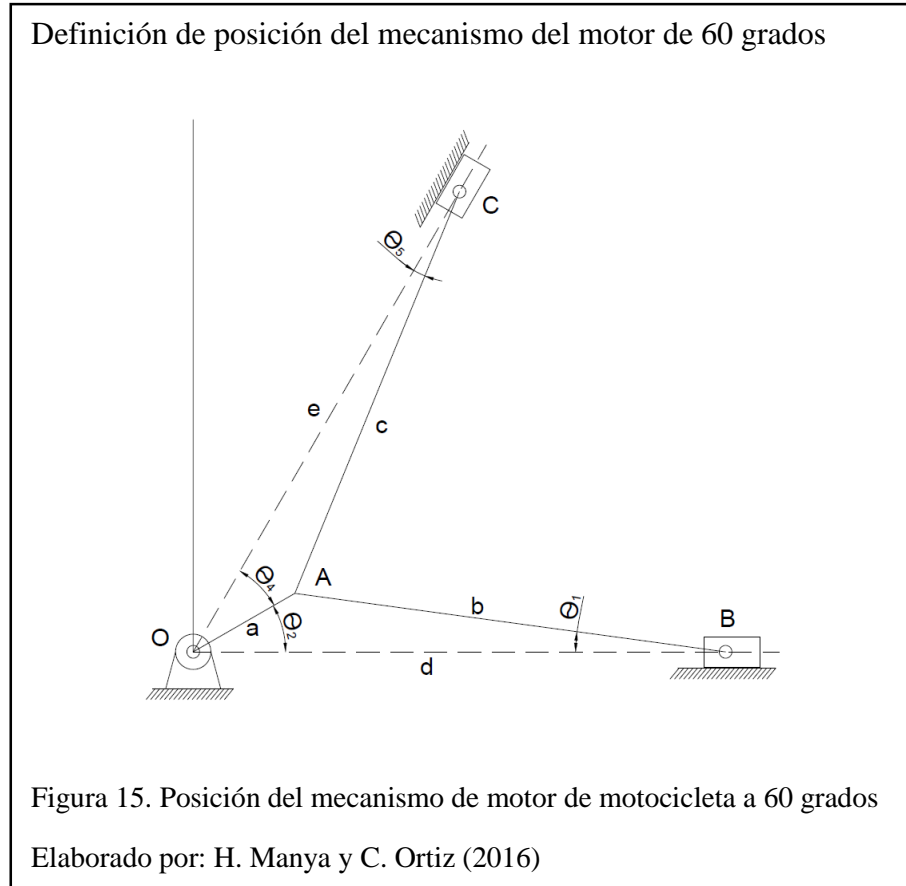
Donde

OA: Distancia desde el centro del muñón de apoyo hasta el centro del muñón de la biela.

AB: Longitud de la biela del pistón B.

BC: Longitud de la biela del pistón C.

Que se describe en la Figura 15, cuya potencia máxima se desarrolla cuando $w_{OA} = 1800 \text{ rev}/\text{min}$, como se describe en la Tabla 2.

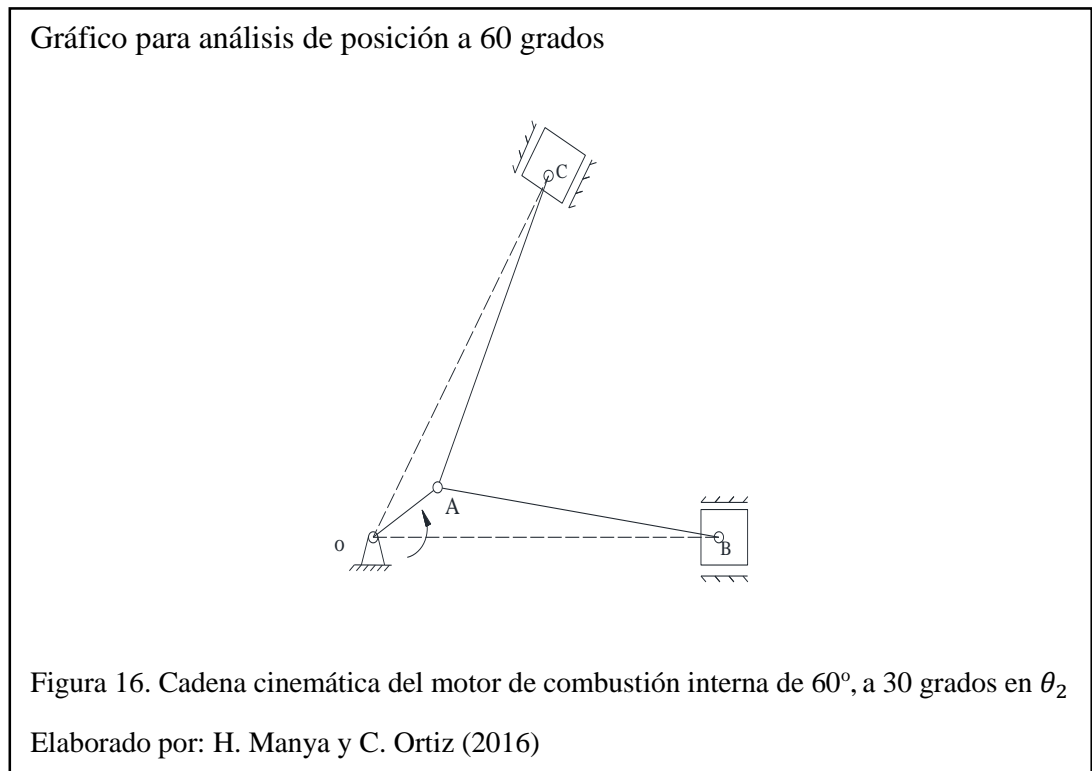


2.6. Análisis de velocidades del motor de combustión interna método gráfico

Una vez que se ha seleccionado el motor de combustión interna, y con la ayuda de las medidas de los elementos como son pistón, bielas y cigüeñal, se realiza el diagrama cinemático, análisis de grados de libertad, cálculo de las velocidades y aceleraciones de cada biela y pistón. El procedimiento de este apartado se encuentra mejor detallado en el Anexo 17.

En la Figura 16, se define la posición del mecanismo del motor de combustión interna sin dimensiones para una mejor visualización y el posterior cálculo de las

velocidades, y aceleración. El sentido de giro del mecanismo será anti horario, es decir en sentido contrario a las manecillas del reloj.



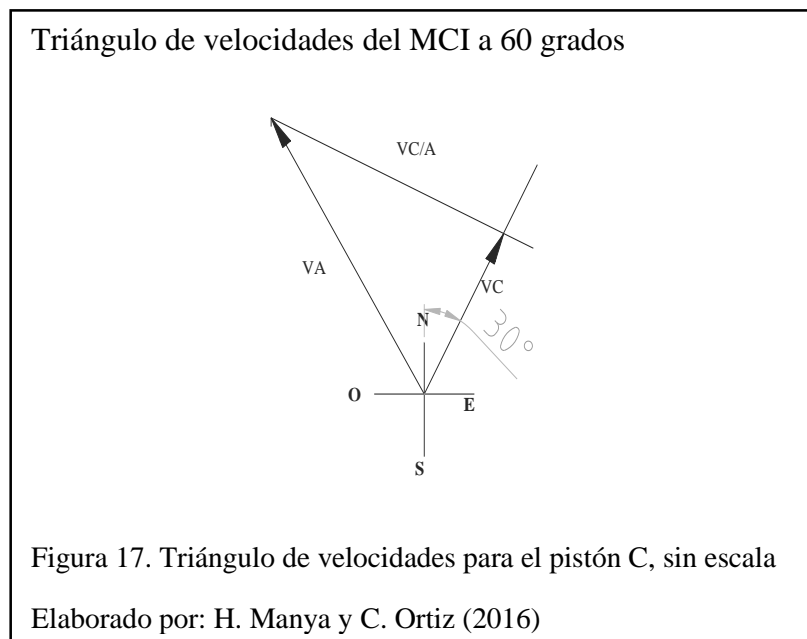
Uno de los cálculos principales que se debe realizar en un mecanismo es la del grado de libertad, para saber si este tiene movimiento o no, para ello se toma la Ecuación 1, con el cual obtenemos que el grado de libertad del motor de combustión interna es igual a $W=1$.

La realización de los cálculos de velocidad y aceleración se basan en relaciones geométricas que existen entre las magnitudes de los componentes del mecanismo. Para ello se adopta el método de las velocidades relativas, en la cual se conoce la velocidad del punto A, y la dirección. Se desea calcular la velocidad del punto B, y para ello se utiliza el método de velocidades relativas que se definió como la Ecuación 3.

Como se sabe que la velocidad relativa del punto B respecto a A, $V_{B/A}$ es perpendicular a la línea que une los puntos A y B del eslabón, teniendo esto en cuenta se procede a calcular la velocidad como se muestra en la Figura 17.

Se convierte las unidades de la velocidad angular w_{0A} , a las unidades de radianes sobre segundo, obteniendo $w_{0A} = 188,495 \text{ rad/s}$, con esto ya se puede calcular la velocidad tangencial de A con la Ecuación 2, y se obtiene que $V_A = 6,22 \text{ m/s}$.

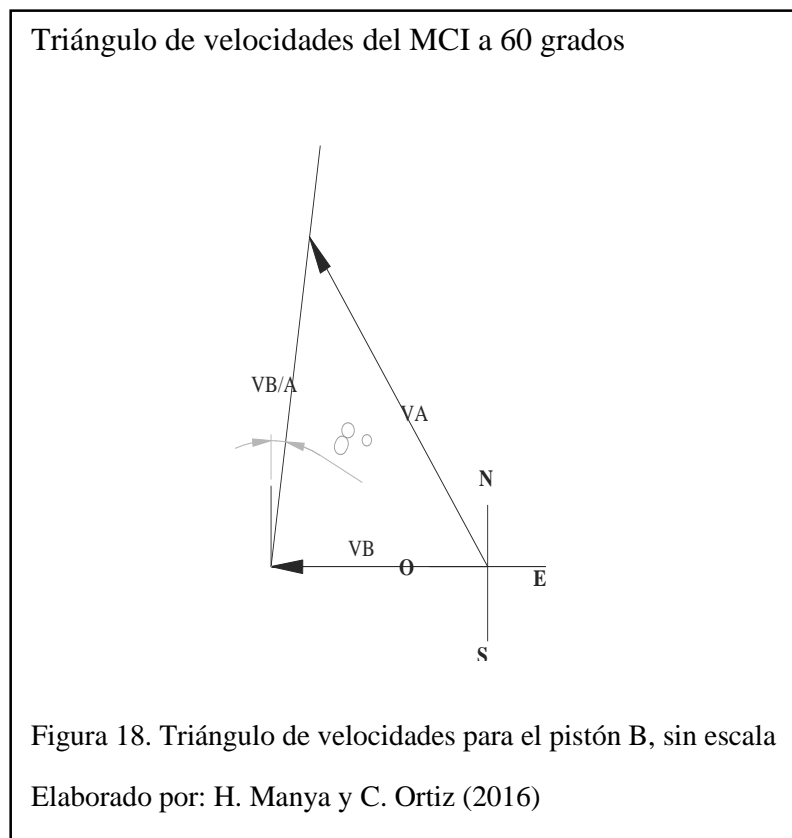
Se realiza el triángulo de velocidades para encontrar las velocidades en cada uno de los pistones, como se muestra en la Figura 17.



De la misma manera como se calculó la velocidad en el punto A, se procede a realizar el cálculo utilizando la Ecuación 3. Obteniendo de esta manera que $V_{C/A} = 5,58 \text{ m/s}$, con dirección $N67^{\circ}O$, y $V_C = 3,5 \text{ m/s}$, con dirección $N30^{\circ}E$. Todos estos

resultados son elaborados con el método de velocidades relativas mencionadas en el capítulo 1.

Para calcular la velocidad del pistón B, se realiza un nuevo triángulo de velocidades (Ecuación 4) donde se relacione la velocidad V_A , como se muestra en la Figura 16. Con esto se obtiene que $V_{B/A} = 5,27 \text{ m/s}$, con dirección $N8^\circ E$, y $V_B = 4,12 \text{ m/s}$, con dirección O .



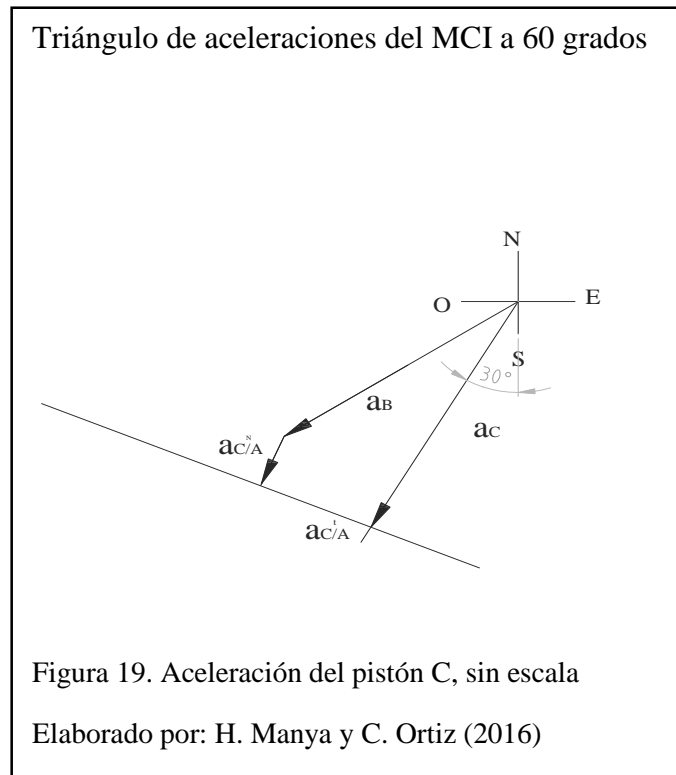
2.7. Análisis de aceleración del motor de combustión interna método gráfico

Se adopta el método de las aceleraciones relativas, en la cual se conoce la aceleración del punto A, y la dirección. Se desea calcular la aceleración del punto B, y para ello se utilizará el método de aceleraciones relativas, cuya representación es las

ecuaciones 7 y 8. Los procedimientos para la resolución de este apartado se encuentran en el Anexo 17.

Como se sabe que la aceleración relativa del punto B respecto A, V_{CB} es perpendicular a la línea que une los puntos A y B del eslabón, teniendo esto en cuenta, se procede a calcular la velocidad como se muestra en la Figura 19.

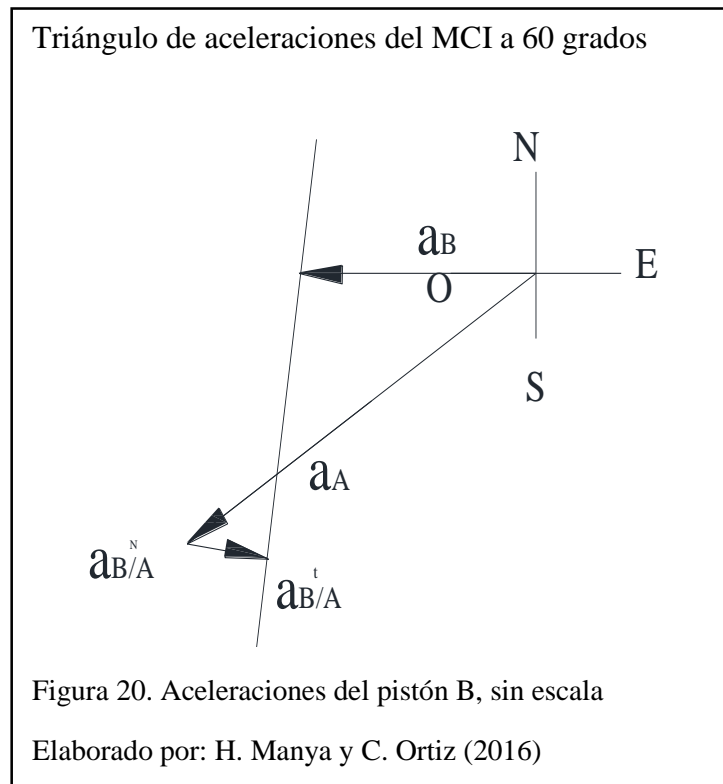
Con esto ya se puede calcular la aceleración, $a_{C/A}^N = 255,21 \text{ m/s}^2$ y $a_C = 1237 \text{ m/s}^2$ con dirección $S30^\circ O$.



Para calcular la aceleración del pistón B, se realiza un nuevo triángulo de velocidades donde se relacione la aceleración a_A , como se muestra en la Figura 19.

De la misma manera como se calculó la aceleración en el punto C, se procede a realizar el cálculo utilizando las ecuaciones 7 y 8. Obteniendo de esta manera que $a_{B/A}^N = 227,64 \text{ m/s}^2$ y $a_C = 6,62,6 \text{ m/s}^2$ con dirección O .

Todos estos resultados son elaborados con el método de aceleraciones relativas mencionadas en el Capítulo 1.



2.8. Análisis de posición método algebraico del motor de combustión interna de la motocicleta

Como se mencionó anteriormente, aunque el análisis gráfico de la posición, velocidad y aceleración de un mecanismo es rápido y práctico, resulta muy complicado analizar dichos parámetros en cualquier punto que el ingeniero crea

conveniente. Por ello en este apartado desarrollamos una Ecuación que haga posible el cálculo de cualquier punto del eslabón.

Este mecanismo se representará con los vectores a, b, c, d, e . por ambos lados la suma vectorial de estos dará un valor a 0.

$$\text{Entonces: } a - b - c = 0$$

Sustituyendo los equivalente de números complejos por los vectores de posición.

$$ae^{j\theta_2} - be^{j\theta_3} - ce^{j\theta_1} = 0 \quad \text{Ecuación 9}$$

Se sustituyen los equivalentes de Euler:

$$a(\cos\theta_2 + j\sin\theta_2) - b(\cos\theta_3 - j\sin\theta_3) - c(\cos\theta_1 - j\sin\theta_1) = 0 \quad \text{Ecuación 10}$$

Separamos los componentes real e imaginario

Parte real:

$$a\cos\theta_2 - b\cos\theta_3 - c\cos\theta_1 = 0$$

Pero $\theta_1 = 0$:

$$a\cos\theta_2 - b\cos\theta_3 - c = 0$$

$$c = a\cos\theta_2 - b\cos\theta_3 \quad \text{Ecuación 11}$$

Para calcular el valor de θ_3 , tomaremos la parte imaginaria de la Ecuación 10.

$$j\sin\theta_2 - j\sin\theta_3 - j\sin\theta_1 = 0$$

Pero $\theta_1 = 0$:

$$a \sin \theta_2 - b \sin \theta_3 = 0$$

$$\theta_3 = \sin^{-1} \left(\frac{a \sin \theta_2}{b} \right) \quad \text{Ecuación 12}$$

El resultado del despeje de la Ecuación 12 nos da dos soluciones validas correspondientes a los dos circuitos del mecanismo. Por consiguiente para calcular el valor de θ_3 para el segundo circuito del mecanismo tendremos la expresión.

$$\theta_3 = \pi - \sin^{-1} \left(\frac{a \sin \theta_2}{b} \right) \quad \text{Ecuación 13}$$

Para trabajar de mejor manera en el segundo eslabón y evitarnos complicaciones colocamos un segundo eje de referencia X' y Y' , en dirección al eje del segundo eslabón. El gráfico del mecanismo en estudio nos muestra que el eje de referencia X' y Y' se encuentran desfasado con el eje de origen en un ángulo de 60° , por este motivo el valor de θ_4 se halla mediante la expresión.

$$\theta_4 = \theta_2 - 60 \quad \text{Ecuación 14}$$

Con ello aplicaremos nuevamente la Ecuación 10, pero con los ángulos correspondientes al eje de referencia X' y Y' encontrando la siguiente expresión.

$$a(\cos \theta_4 + j \sin \theta_4) - b(\cos(\theta_5 - 60) - j \sin(\theta_5 - 60)) - c(\cos \theta_6 - j \sin \theta_6) = 0 \quad \text{Ecuación 15}$$

El valor de 60 que aparece en la Ecuación 15, es el ángulo de 60° de desfase del eje de los eslabones.

Separamos los componentes real e imaginario

Parte real:

$$acos\theta_4 - bcos(\theta_5 - 60) - ccos\theta_6 = 0$$

Pero $\theta_6 = 0$

$$acos\theta_4 - dcos(\theta_5 - 60) - e = 0$$

$$e = acos\theta_4 - bcos(\theta_5 - 60) \quad \text{Ecuación 16}$$

Para calcular el valor de θ_6 , tomaremos la parte imaginaria de la Ecuación 15.

$$jasen\theta_4 - jbsen(\theta_5 - 60) - jcsen\theta_6 = 0$$

Pero $\theta_6 = 0$:

$$asen\theta_4 - bsen\theta_4 = 0$$

$$\theta_3 = sen^{-1}\left(\frac{asen\theta_4}{b}\right) + 60 \quad \text{Ecuación 17}$$

Nuevamente el resultado del despeje da dos soluciones validas correspondientes a los dos circuitos del mecanismo. Por consiguiente para calcular el valor de θ_5 para el segundo circuito del mecanismo tendremos la expresión.

$$\theta_5 = \pi + 60 - sen^{-1}\left(\frac{asen\theta_2}{b}\right) \quad \text{Ecuación 18}$$

2.9. Programación en Matlab para el análisis de la posición del mecanismo

Ya que se ha logrado deducir la formula general para calcular la posición de los eslabones en cualquier punto, se procede al uso del software matemático (*MATLAB*), para el análisis de la posición.

Los resultados de cada posición de los eslabones c, e y sus ángulos respectivos como se muestran en la Tabla 3, y en la Figura 19, la trayectoria del mecanismo en un revolución completa.

Esta Tabla se comparará más adelante con los datos del motor Stirling tipo alfa, para ver las semejanzas y diferencias que ayudaran al diseño de un nuevo componente o simplemente al rediseño de un componte. El cálculo de la Tabla 3 es importante en el presente proyecto, porque en ella se puede ver el comportamiento de los desplazamientos de ambos pistones, y el ángulo que adopta los ángulos en dichos desplazamientos. Los códigos generados para el cálculo de las posiciones del motor de combustión interna de la motocicleta se encuentran en los anexos 3 y 4.

Tabla 3: Variaciones de posición y ángulo de la cadena cinemática del motor de combustión interna a 60 grados.

Angulo de giro θ_2	c (mm)	θ_1 (grados)	e (mm)	θ_5 (grados)
0	155.3000	0	135.4140	14
20	152.7879	5	145.7259	10
40	145.7259	10	152.7879	5
60	135.4140	14	155.3000	0
80	123.6334	15	152.7879	5
100	112.1727	15	145.7259	10
120	102.4140	14	135.4140	14
140	95.1670	10	123.6334	15
160	90.7682	5	112.1727	15
180	89.3000	0	102.4140	14
200	90.7682	5	95.1670	10
220	95.1670	10	90.7682	5

Continuación Tabla 3.

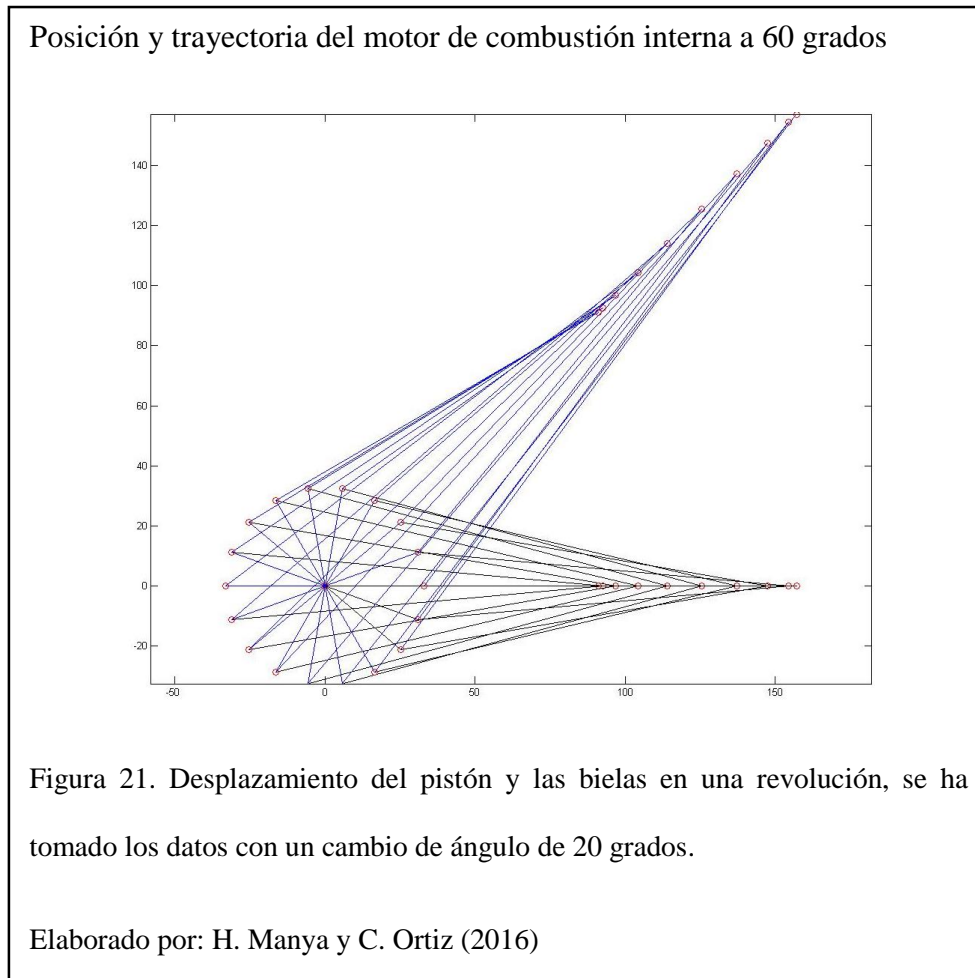
240	102.4140	14	89.3000	0
260	112.1727	15	90.7682	5
280	123.6334	15	95.1670	10
300	135.4140	14	102.4140	14
320	145.7259	10	112.1727	15
340	152.7879	5	123.6334	15
360	155.3000	0	135.4140	14

Nota: Todos los datos tabulados es esta tabla, son generados a partir de las ecuaciones deducidas anteriormente y traducidas al lenguaje del software matemático de MATLAB. Los códigos generados se encuentran en la sección Anexos.

(Descripción): Contiene el desplazamiento del pistón B, C y los ángulo de θ_1 , θ_5 con una variación de θ_2 de 20 grados. Tomando como punto de partida el eje X positivo y con el sentido de giro anti horario.

Elaborado por: H. Manya y C. Ortiz (2016)

La Figura 21 muestra la posición y trayectoria del mecanismo del motor de combustión interna en un ciclo completo de giro. Se calculó con el código utilizado en Matlab (Anexo 3 y 4) para calcular los datos de la Tabla 3.



2.10. Análisis de velocidad método algebraico del motor de combustión interna de la motocicleta

Velocidad en A (muñón de la biela)

Para analizar la velocidad se tendrá que derivar las ecuaciones de posiciones en función del ángulo desconocido que es la variable.

Se toma las ecuaciones de velocidades según los autores (Valdés & Macián, 2014).

La velocidad del cigüeñal y el punto de la muñequilla, se desplazará en torno al centro fijo O y radio a . Por esta razón las ecuaciones de velocidad quedan como:

$$V_{Ay} = -aw\cos\theta_2 \quad \text{Ecuación 19}$$

Y en la componente x:

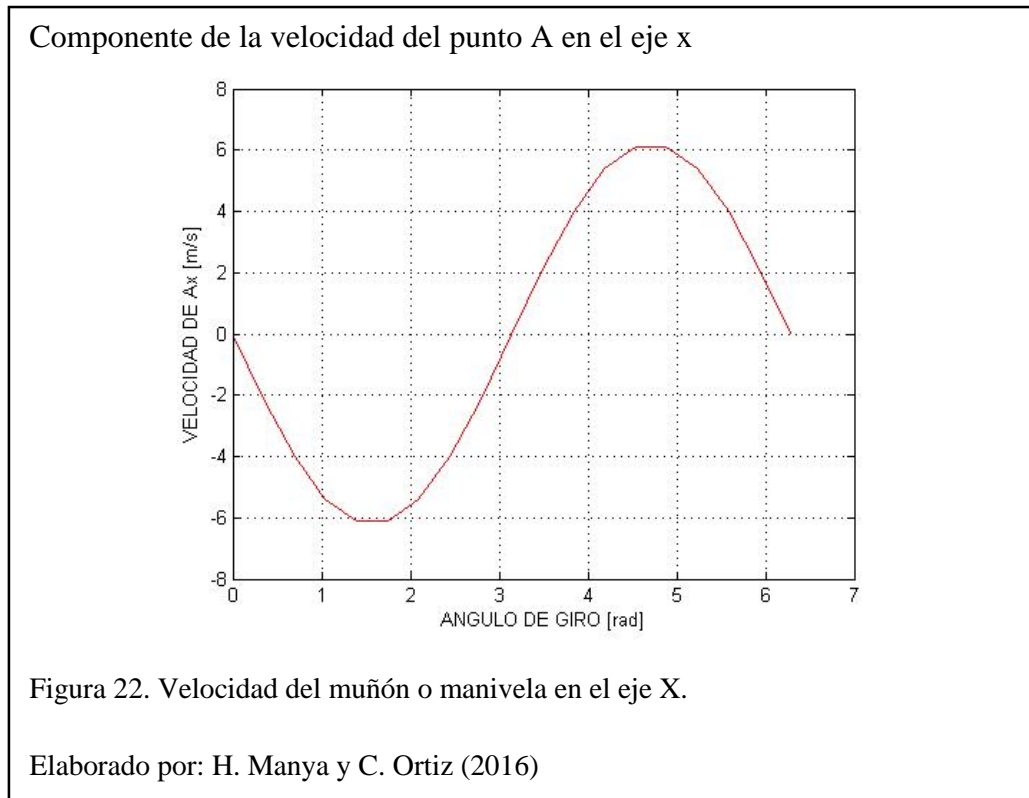
$$V_{Ax} = -awsen\theta_2 \quad \text{Ecuación 20}$$

Las ecuaciones 19 y 20 nos ayudan a calcular la velocidad de A en ambos ejes, pero para un rápido análisis de la velocidad de A, tomaremos la resultante de estos dos componentes que se expresa con la Ecuación 21.

$$V_A = \sqrt{V_{Ay}^2 + V_{Ax}^2} \quad \text{Ecuación 21}$$

w es la velocidad angular con el que gira el punto a en el momento del cálculo, a es el radio de giro. Con esto calcularemos la velocidad del punto A, con la ayuda del software de análisis matemático.

En las figuras 22 y 23, se puede observar la descomposición de la velocidad en A, esto se obtiene mediante las ecuaciones 19 y 20 respectivamente , traducidas a Matlab para que genere las figuras que se muestra a continuación en la Figura 22.



Las velocidades del punto A en un motor de combustión interna de una motocicleta y el motor Stirling tipo alfa, siempre serán iguales sea cual sea la velocidad angular que tomemos de referencia.

Componente de la velocidad del punto A en el eje y

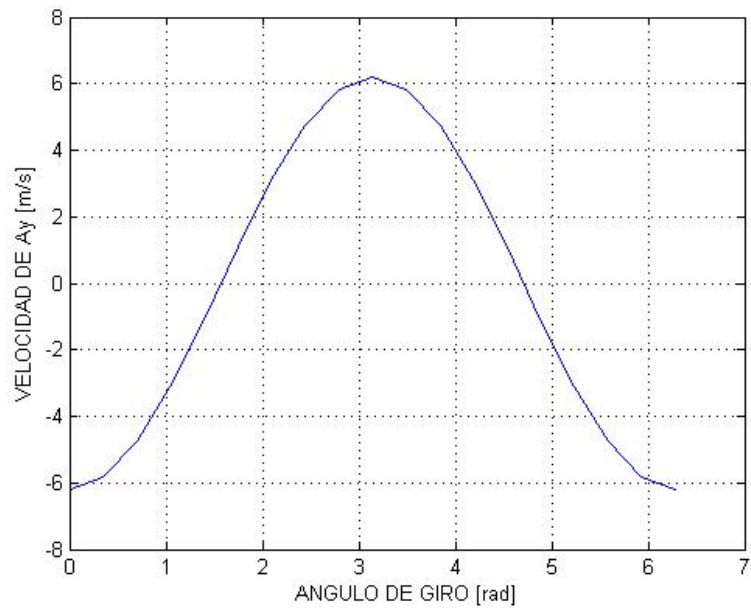
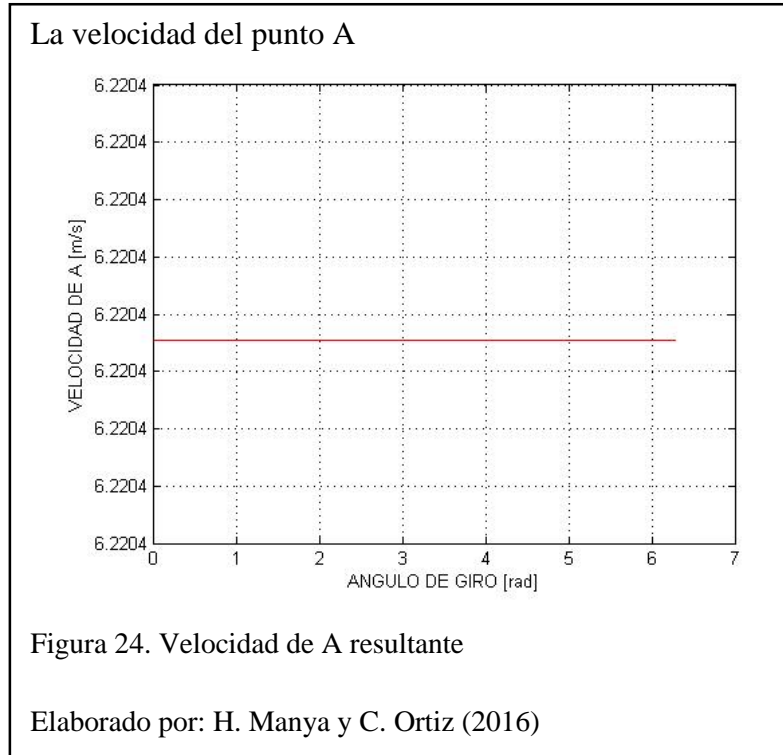


Figura 23. Componente de la velocidad de punto A en el eje Y.

Elaborado por: H. Manya y C. Ortiz (2016)

En la Figura 24 se puede observar que en este punto la velocidad es constante a lo largo de un ciclo de giro completo, como se calculó gráficamente $V_A = 6,22 \text{ m/s}$.



Velocidad en B (pistón B)

Para calcular las velocidades en el punto B, se toma las ecuaciones deducidas en el libro, (Valdés & Macián, 2014, pág. 827).

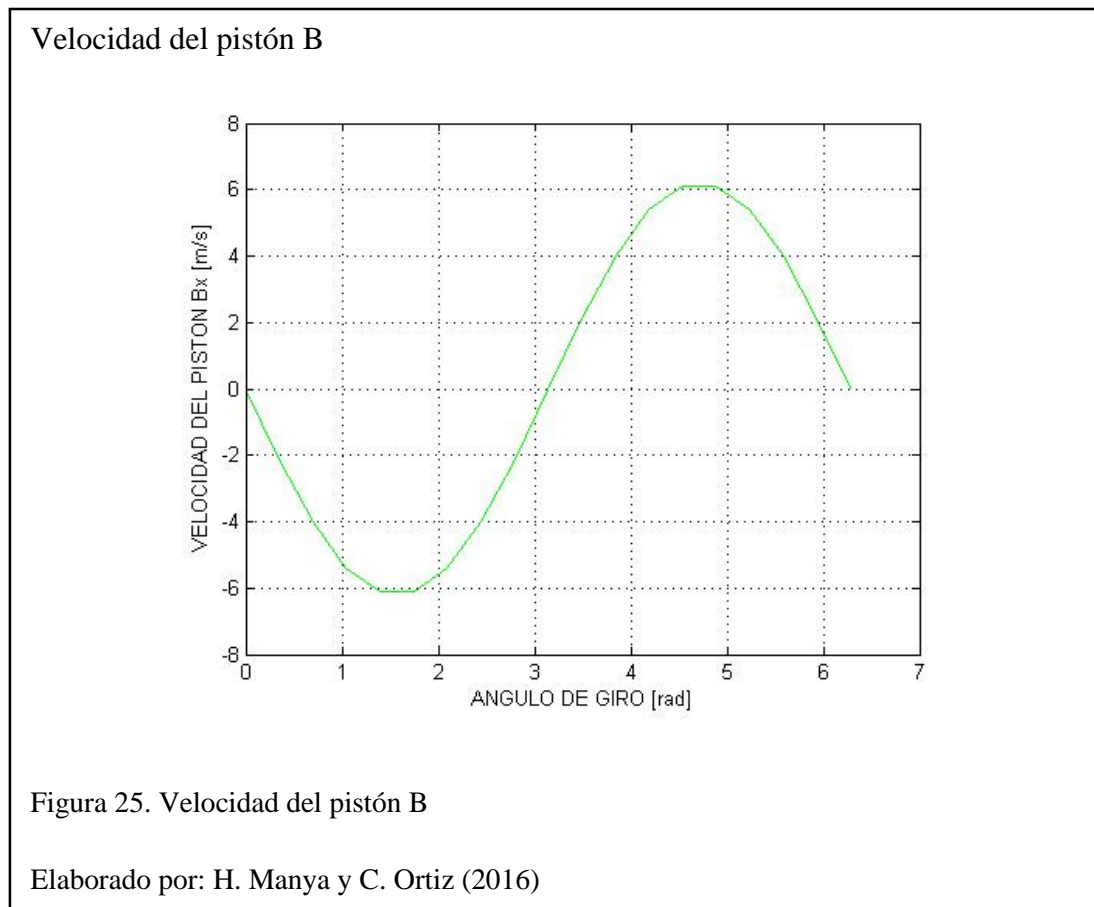
Las velocidades del punto B en el motor de combustión interna y el motor Stirling serán siempre iguales dado la configuración de los mecanismos, estas no varían al cambiar la velocidad angular, y permanecen siempre iguales. La Ecuación 22, servirá para el análisis de velocidad en este punto.

$$V_{Bx} = -aw \frac{\text{sen}(\theta_2 + \theta_1)}{\cos \theta_1} \quad \text{Ecuación 22}$$

De acuerdo a la configuración y definición de posición (Figura 15), tomado para este proyecto, el punto B solo tiene un desplazamiento en el eje X, por tanto tenemos que:

$$V_{By} = 0 \quad \text{Ecuación 23}$$

La Figura 25, muestra dicha situación, que se obtuvo haciendo los cálculos respectivos en el software matemático Matlab, se tiene que la velocidad de B en Y es nula y la velocidad de B en X la siguiente.



Velocidad en C (pistón C)

El análisis de la velocidad en el punto C se hace tomando en cuenta la desviación de 60 grados de los pistones uno respecto al otro del motor de combustión interna de la motocicleta.

Por ello se toma las ecuaciones 22 y 23, analizadas para el cálculo de la velocidad en el punto B y se agrega la respectiva desviación de 60° .

$$V_{Cx} = -aw \frac{\text{sen}(\theta_4 + \theta_5)}{\cos\theta_5} \quad \text{Ecuación 24}$$

$$\text{Pero } \theta_4 = \theta_2 - 60$$

Con ello podemos calcular la velocidad de Pistón C en cada instante de giro.

A diferencia del punto B, este si tiene un componente de velocidad en Y. Para calcular esta componente, Ecuación 25.

$$V_{Cy} = -c \frac{a}{c} w \cos\theta_4 \quad \text{Ecuación 25}$$

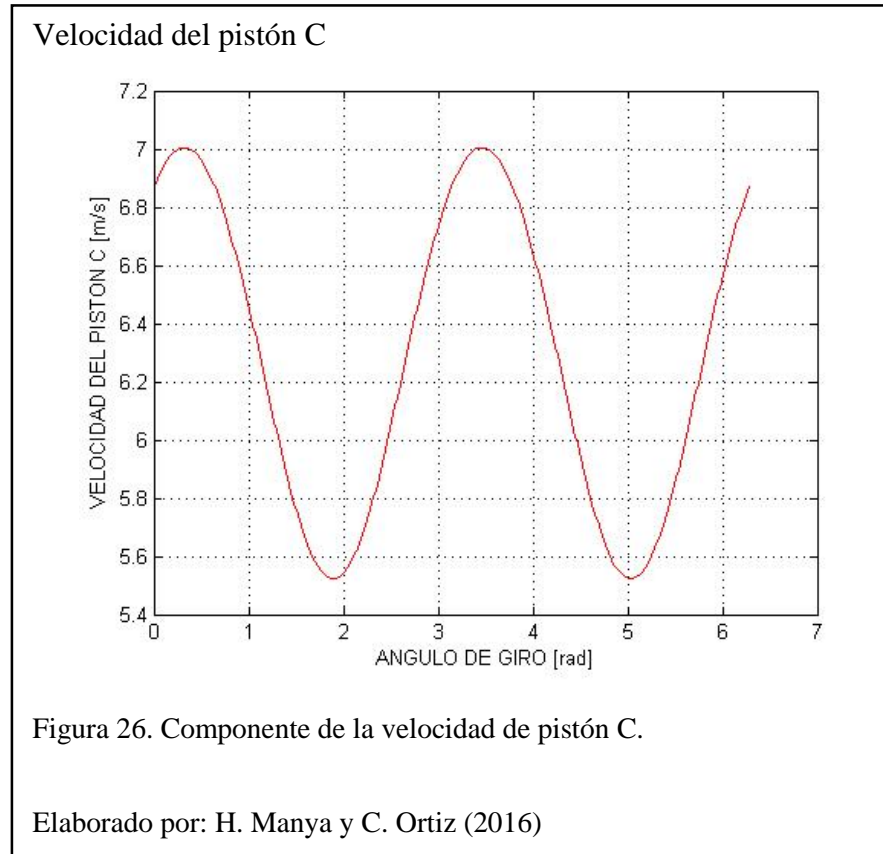
Las ecuaciones 24 y 25 ayudaran a calcular la velocidad de C en ambos ejes, pero para un rápido análisis de la velocidad de C, se toma la resultante de estos dos componentes que se expresa con la Ecuación 26.

$$V_C = \sqrt{V_{Cy}^2 + V_{Cx}^2} \quad \text{Ecuación 26}$$

Nótese que la θ_5 , será proporcionalmente igual a θ_1 , pero en un ángulo de 60° .

Con estas apreciaciones se puede calcular la velocidad en C.

La Figura 26, se obtuvo haciendo los cálculos respectivos de las ecuaciones 24, 25 y 26 en el software matemático Matlab.



2.11. Análisis algebraico de la aceleración del motor de combustión interna de la motocicleta

Aceleración en A (Muñón de la biela)

Al hacer la derivada de las ecuaciones 19 y 20, se obtiene las aceleraciones de A, como se muestra en la Ecuación 27.

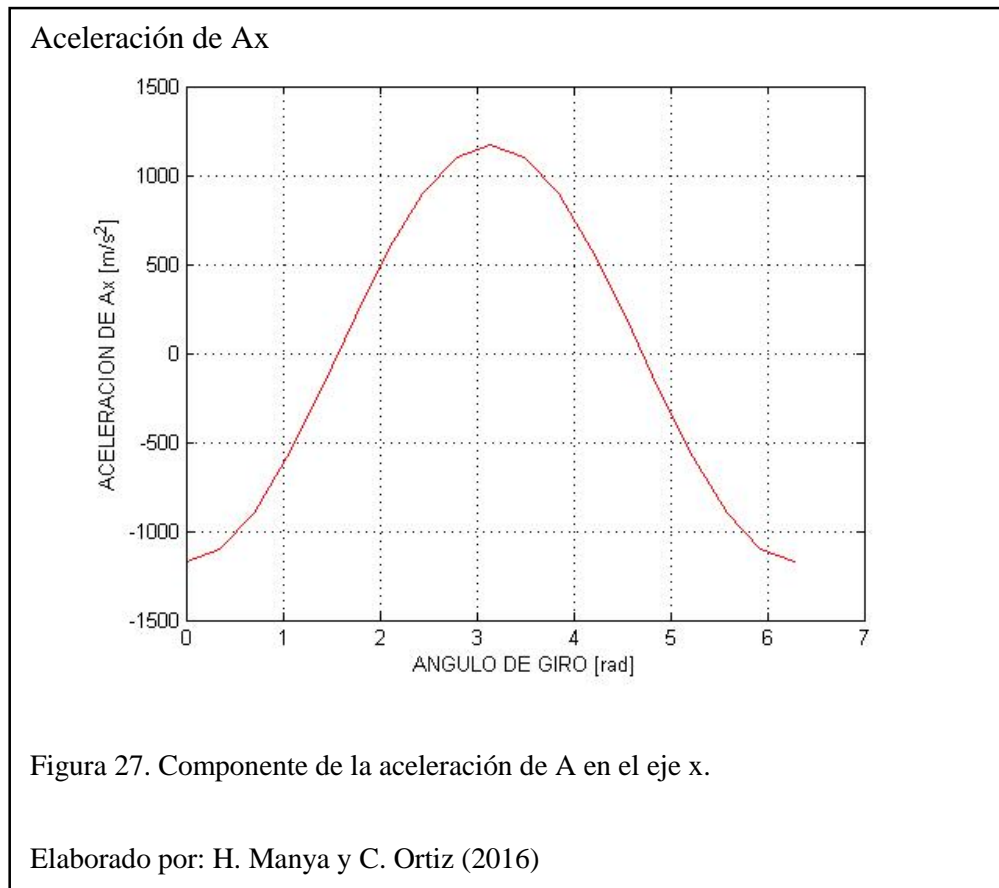
$$a_{Ax} = -aw^2 \cos \theta_2 \quad \text{Ecuación 27}$$

Y la componente en Y con la Ecuación 28.

$$a_{Ay} = -aw^2 \sin \theta_2 \quad \text{Ecuación 28}$$

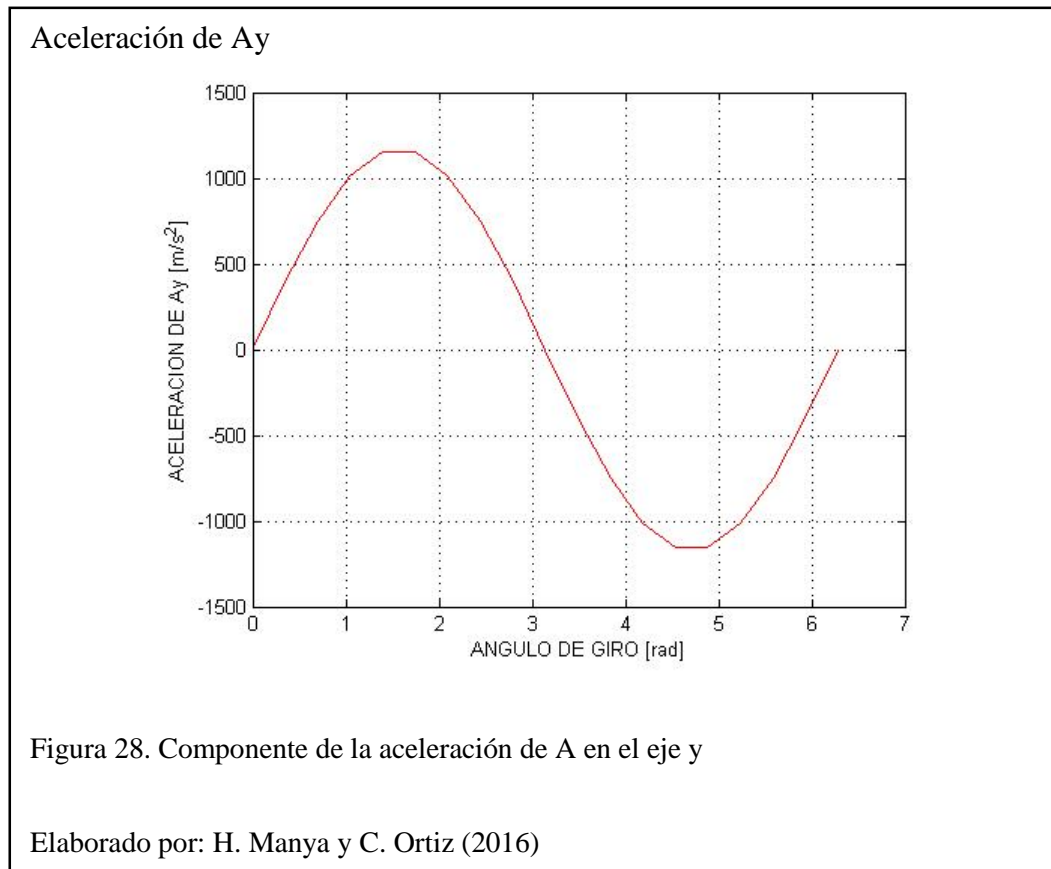
w es la velocidad angular con el que gira el punto a en el momento del cálculo, a es el radio de giro.

Se calcula la aceleración del punto A , con la ayuda de Matlab como se muestra en la Figura 27.



La Figura 27 y 28 son componentes de la aceleración del punto A en un giro completo del mecanismo biela – manivela, calculadas con las ecuaciones 27 y 28.

En la Figura 28 se muestra la componente en Y para obtener las aceleraciones.



Estas aceleraciones del punto A, serán iguales a las del motor Stirling tipo alfa sea cual fuere las velocidades angulares con las que se calcule. Debido a las configuraciones de ambos mecanismo como se puede ver en las figuras 15 y 32.

Aceleración en B (pistón B)

Para calcular las aceleraciones en el punto B, se tomará las ecuaciones deducidas en el libro, (Valdés & Macián, 2014, pág. 827).

Las aceleraciones del punto B en el motor de combustión interna y el motor Stirling serán siempre iguales dado la configuración de los mecanismos, estas no varían al cambiar la velocidad angular, la velocidad tangencial y permanecen siempre

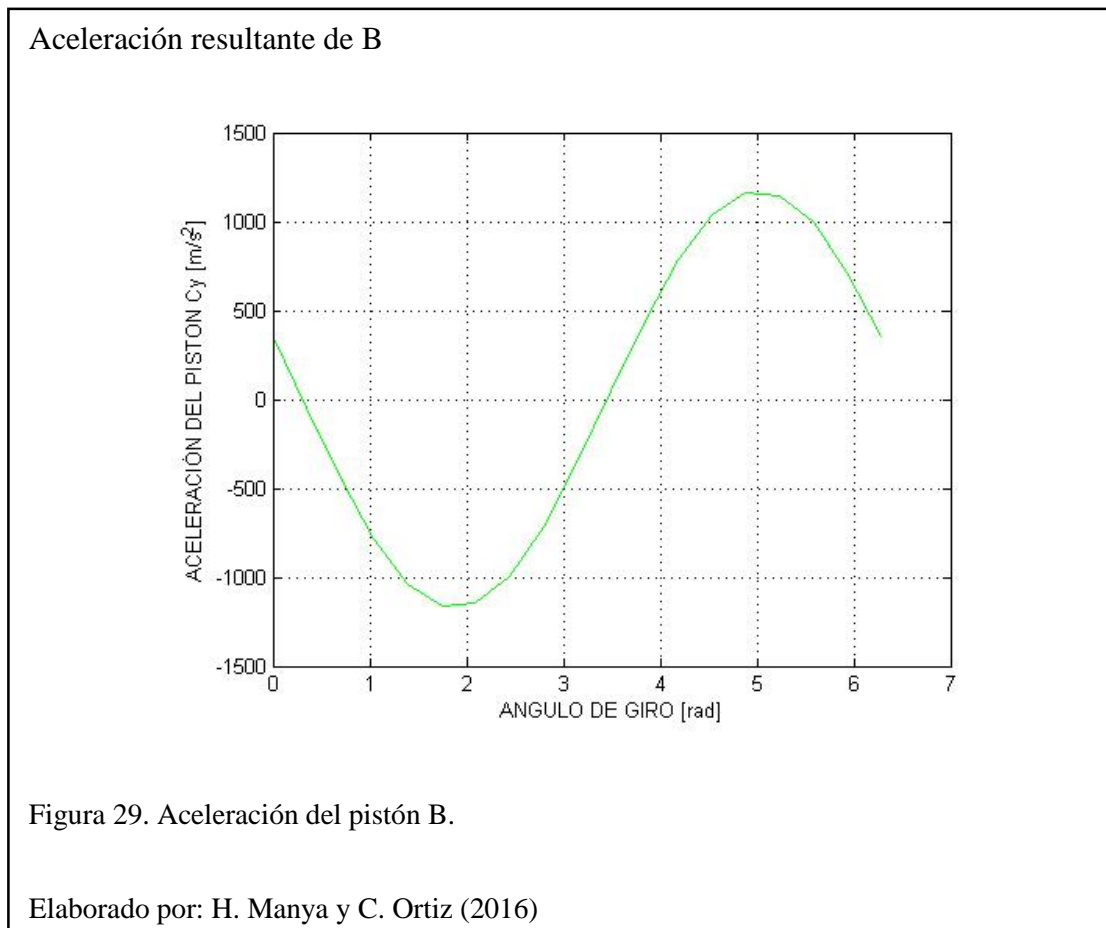
iguales. La Ecuación 29, se la calcula a partir de la derivada de la velocidad en el eje X, y la Ecuación 30 no es igual a 0, porque con la configuración adoptada en la Figura 15 no tiene componente en el eje Y.

$$A_{xB} = -aw^2 \left[\frac{\cos(\theta_2 + \theta_1)}{\cos\theta_1} + \frac{R\cos^2\theta_2}{\cos^3\theta_1} \right] \quad \text{Ecuación 29}$$

La componente en el eje Y, no tendrá valor como se muestra en la Ecuación 30.

$$A_{yB} = 0 \quad \text{Ecuación 30}$$

Haciendo los cálculos respectivos en el software matemático Matlab se tiene que la aceleración de B en Y es nula y la aceleración del B en X.



Como se puede observar en la Figura 29 que se obtuvo generando los códigos en Matlab como que se encuentra en el Anexo 9.

Aceleración en C (pistón C)

El análisis de la aceleración en el punto C se realiza tomando en cuenta la desviación de 60^0 que tienen los pistones uno respecto al otro.

Por ello se adopta las ecuaciones 29 y 30, analizadas para el cálculo de la aceleración en el punto B y le agrega la respectiva desviación de 60^0 . Por la configuración adoptada según la Figura 15, por tanto queda determinada la Ecuación 31.

$$A_{Cx} = -aw^2 \left(\frac{\text{sen}(\theta_4 + \theta_5)}{\cos\theta_5} + \frac{a \cos^2\theta_4}{c \cos^3\theta_5} \right) \quad \text{Ecuación 31}$$

$$\text{Pero } \theta_4 = \theta_2 - 60$$

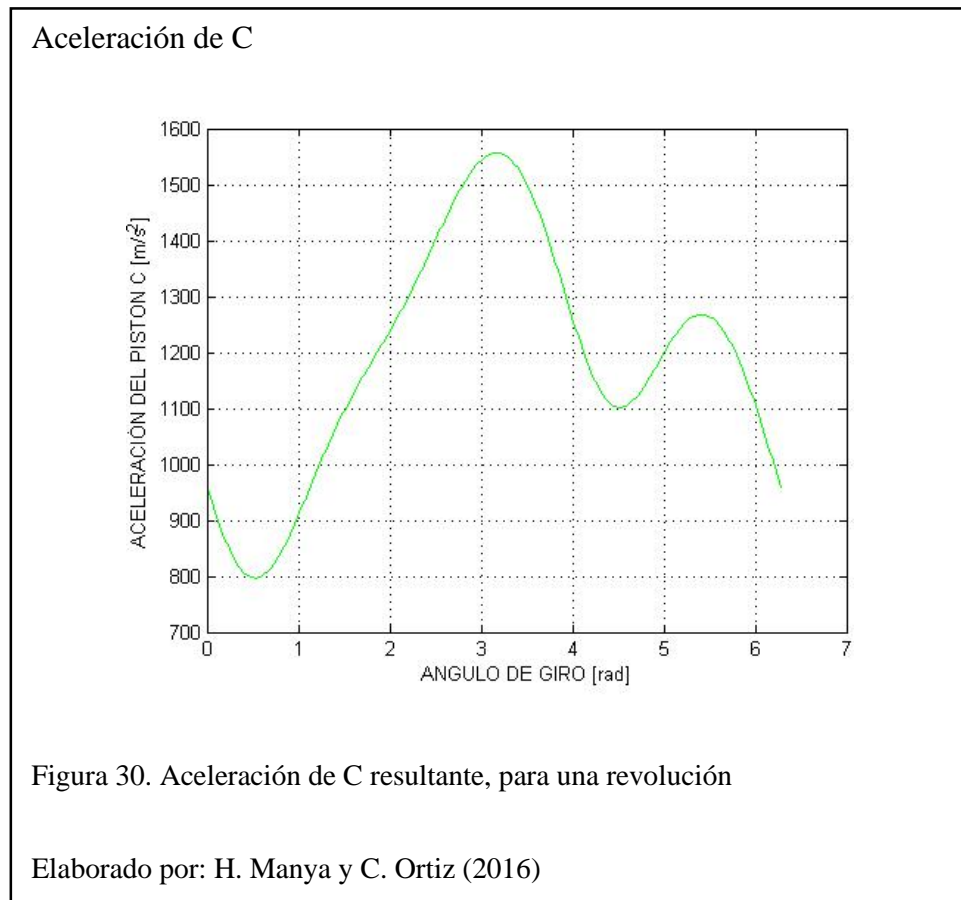
Con ello se puede calcular la aceleración de Pistón C en el eje x en cada instante de giro.

A diferencia del punto B, este si tiene un componente de aceleración en Y. Para calcular esta componente tenemos la siguiente Ecuación 32.

$$A_{Cy} = -\frac{a}{c} w^2 \text{sen}\theta_4 \quad \text{Ecuación 32}$$

Nótese que la θ_5 , será proporcionalmente igual a θ_1 , pero en un ángulo de 60^0 .

La Figura 30, se obtuvo haciendo los cálculos respectivos de las ecuaciones 31 y 32 en el software matemático Matlab. (Anexo 10)



2.12. Análisis de la presión máxima desarrollada durante la combustión del motor de combustión interna

Para calcular las fuerzas necesarias para mover los cigüeñales del motor de combustión interna es necesario saber las presiones máximas generadas por el combustible al momento de la explosión. Esto se determina mediante la siguiente Ecuación 33.

$$Q_{entrada} = PCI \times F \quad \text{Ecuación 33}$$

Y la Ecuación 34.

$$F = F_e \times F_r \quad \text{Ecuación 34}$$

Donde:

$Q_{entrada}$: El calor de entrada provocada por la combustión.

PCI : Poder calorífico del combustible.

F : Dosado estequiométrico.

F_e : Factor de dosado estequiométrico.

F_r : Dosado relativo.

Con estos parámetros se procede a calcular el calor generado por el combustible, para ello nos interesa saber el factor de dosado estequiométrico de la Ecuación 34, que normalmente en los motores a gasolina es 1/15. Este factor es de gran importancia en la combustión porque determina la cantidad de combustibles presentes en la mezcla. El dosado relativo indicará la desviación de la constitución de mezcla, aire – combustible respecto estequiométrico, se elige el valor de 0.5 para el dosado relativo típico, (Herrera García, 2014, pág. 34).

$$Q_{entrada} = 1466,67 \text{ kJ/kg}$$

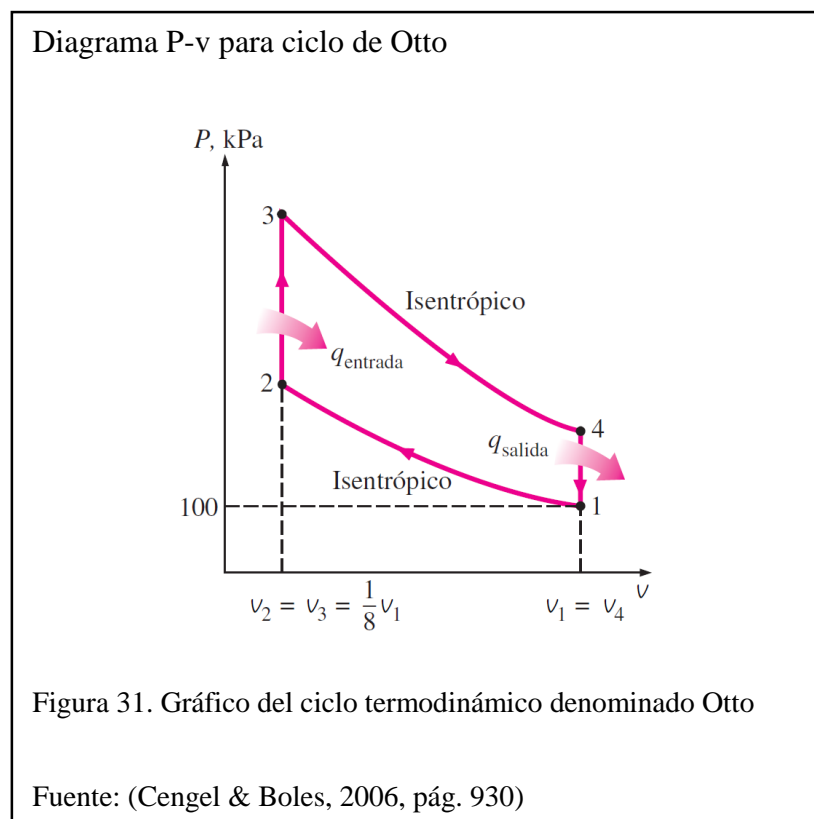
Para el análisis de las fuerzas aplicadas sobre los pistones, e primer lugar se debe analizar las presiones máxima, intermedia y mínima que se produce durante el ciclo termodinámico.

Se considerara un ciclo de Otto ideal, con la relación de compresión del motor de combustión interna 9,4, como se anota en la Tabla 2. Al inicio de la compresión el

aire está a 100 kPa y 25° C , y una adición de calor aportado por la gasolina de $1466,67 \text{ kJ/kg}$

Se aplica las suposiciones de aire estándar. Los cambios de energías cinéticas son insignificantes. Será considerada las variaciones de calores específicos debido a la temperatura. (Cengel & Boles, 2006, pág. 493).

Para mayor entendimiento del ciclo termodinámico tenemos en la Figura 29, el diagrama de Presión – volumen donde se muestra el aporte de calor, la salida de calor, como también la compresión y expansión isentrópica.



Las temperaturas y presiones máximas en un ciclo Otto ocurrirán al final de adicción de calor es decir en el proceso 2 – 3, para ello calcularemos la temperatura y

presión al final del proceso isotrópico de compresión (proceso 1 – 2) usando los datos de la Tabla A.17 del apéndice 1 de los autores (Cengel & Boles, 2006, pág. 930), tenemos que:

$$T_1 = 298 \text{ K} \rightarrow u_1 = 212,64 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$v_{r1} = 631,9$$

Proceso 1 – 2 (compresión isentrópica de gas ideal)

$$\frac{V_{r2}}{V_{r1}} = \frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{r} \rightarrow V_{r2} = \frac{V_{r1}}{r} = \frac{631,9}{9,4} = 67,22$$

Interpolando

$$T_2 = 709,47 \text{ K}$$

$$u_2 = 519,78 \frac{\text{KJ}}{\text{kg}}$$

$$P_2 = P_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right) \left(\frac{v_1}{v_2} \right) = 2237,93 \text{ KPa}$$

Proceso 2 – 3 (adición de calor a volumen constante)

$$q = u_3 - u_2 \rightarrow u_3 = 1986,45$$

Interpolando

$$T_3 = 2315,63 \text{ K}$$

$$v_{r3} = 1,67$$

$$P_3 = P_2 \left(\frac{T_3}{T_2} \right) \left(\frac{v_2}{v_3} \right) = 7304,35 \text{ KPa}$$

Proceso 3 – 4 (expansión isentrópica)

$$\frac{V_{r4}}{V_{r3}} = \frac{V_4}{V_3} = r \rightarrow V_{r4} = rV_{r3} = 9,4 \times 1,67 = 15,698$$

Interpolando

$$T_4 = 1168,92K$$

$$u_2 = 905,76 \frac{KJ}{kg}$$

De donde

$$-q_{salida} = u_1 - u_4 \rightarrow q_{salida} = 693,12 \frac{KJ}{kg}$$

Entonces el trabajo neto

$$W_{neto} = q_{entrada} - q_{salida} \rightarrow W_{neto} = 773,55 \frac{KJ}{kg}$$

$$P_4 = P_3 \left(\frac{1}{r} \right) = 317,1 KPa$$

Ya que se tiene todas las presiones generadas en cada fase del ciclo termodinámico, procedemos a calcular las fuerzas respectivas. Considerando que la presión P_1 es atmosférica y por ende la fuerza que se aplica en ese instante es 0.

$$P = \frac{F}{A} \rightarrow F = P \times A$$

$$F_1 = 0$$

$$F_2 = 4227,45 N$$

$$F_3 = 13797,92N$$

$$F_4 = 599 N$$

Los cálculos de estas fuerzas son muy importantes porque son necesarias para generar el movimiento del pistón como primera fuerza en la simulación dinámica a realizarse en el programa Inventor Profesional (DEMO).

Las posiciones y velocidades de los puntos A, B, C, calculadas en este apartado, ayudarán a visualizar las semejanzas y diferencia que existen entre el motor de combustión interna y el motor Stirling tipo alfa cuando se compare los resultados, para hacer el rediseño o no del mecanismo y saber si puede adquirir la cinemática del motor Stirling tipo alfa.

Capítulo 3

Cinemática del motor Stirling tipo alfa

En el presente capítulo se busca conocer el principio de funcionamiento del motor Stirling tipo alfa y analizar la cinemática de su mecanismo. Se aplicará los fundamentos de análisis cinemático desarrollado en el Capítulo 1.

Los resultados de las posiciones y velocidades de los puntos A, B, C, que se obtengan en este capítulo se compararán con los resultados obtenidos del análisis cinemático del motor de combustión interna en el Capítulo 2, para saber si ambos motores son compatibles y el motor de combustión interna puede adquirir la cinemática del motor Stirling tipo alfa.

3.1. Generalidades del motor Stirling tipo alfa

Definición

Se define como motor Stirling aquel dispositivo que convierte calor en trabajo, o viceversa, a través de un ciclo termodinámico regenerativo, con compresión y expansión cíclica del fluido de trabajo, operando dicho fluido entre dos temperaturas, la del foco caliente y la del foco frío. Cuando la máquina opera de modo volumétrico recibe propiamente el nombre de máquinas Stirling. (Álvarez Flóres & Callejón Agramunt , 2002, pág. 391)

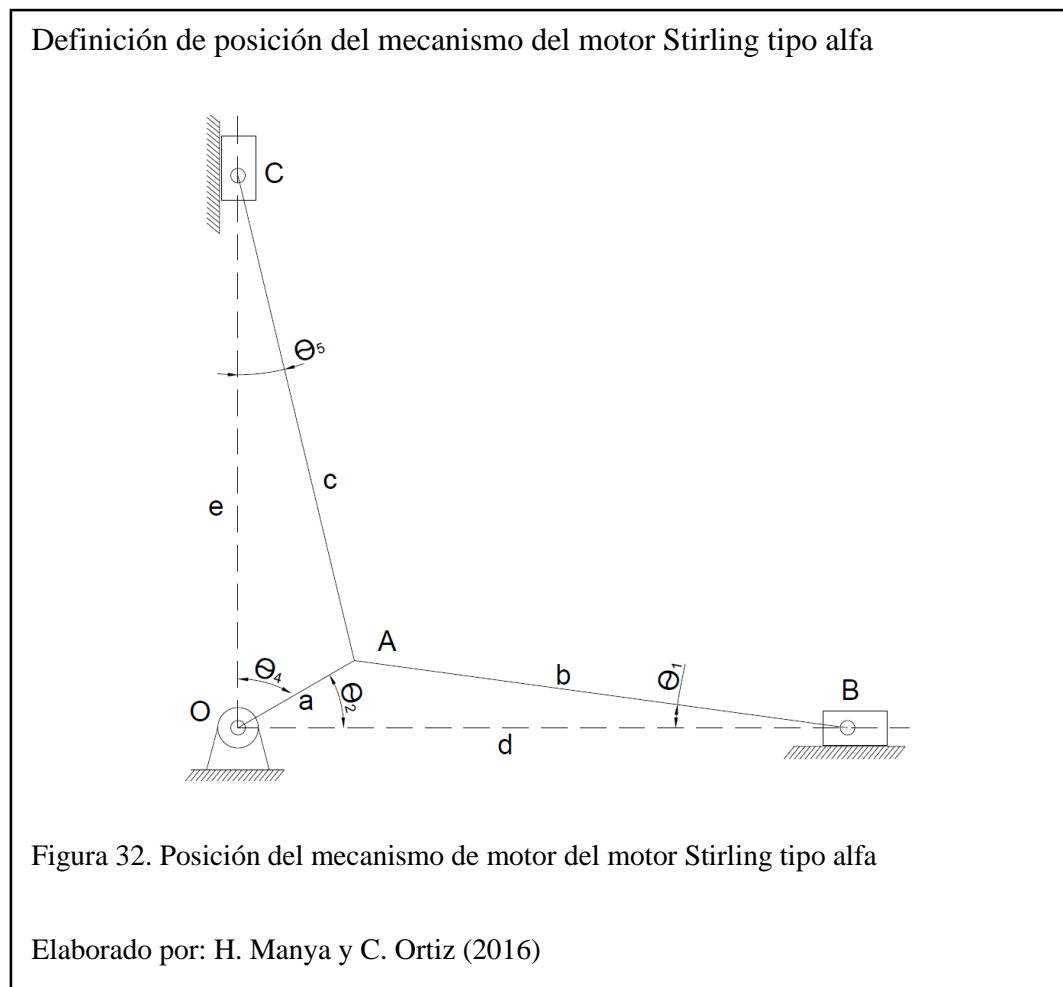
Principio de funcionamiento

El motor Stirling funciona en un ciclo cerrado, el cual obtiene trabajo en cuatro etapas o ciclos térmicos. 1) Aporte calórico, 2) Expansión, 3) Extracción de calor, 4) Compresión.

Específicamente, el motor Stirling tipo alfa difiere de los demás tipos de motores Stirling por la disposición de los pistones que se encuentran desfasados uno respecto al otro en 90 grados, sin embargo el ciclo termodinámico es igual a los demás.

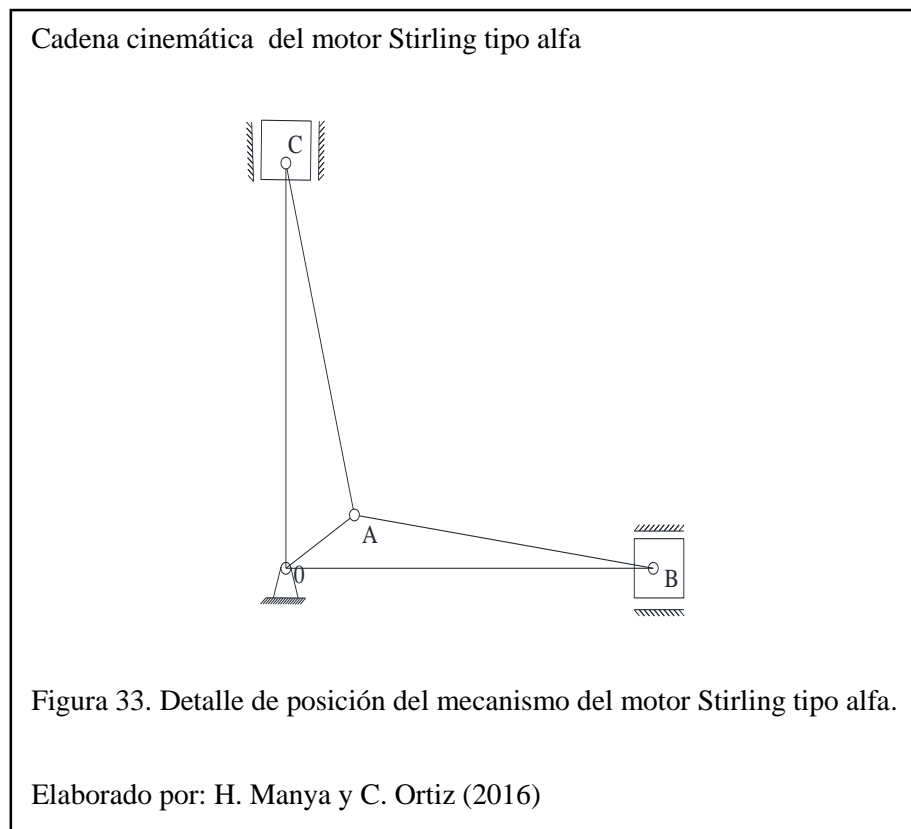
3.2. Análisis de posiciones del motor Stirling

Se define la posición y características del mecanismo del motor Stirling tipo alfa en la Figura 32, esta posición se ha elegido al azar, para el cálculo correspondiente de los grados de libertad, posición, trayectoria, velocidades y aceleraciones.



Como ya se tiene el motor de la motocicleta y se quiere adaptar el motor de combustión interna al motor Stirling tipo alfa, se toman las mismas medidas del apartado 2.5 donde se da las distancias que existen entre el muñón de apoyo de la bancada y el muñón de la biela, las distancias de las bielas C pero en este caso con la configuración de 90 grados como muestra la Figura 32.

Una vez que se ha definido la posición del mecanismo, y con la ayuda de las medidas de los elementos como son pistón, bielas y cigüeñal, se realiza el diagrama cinemático, análisis de grados de libertad, cálculo de las velocidades y aceleraciones de cada biela y pistón.



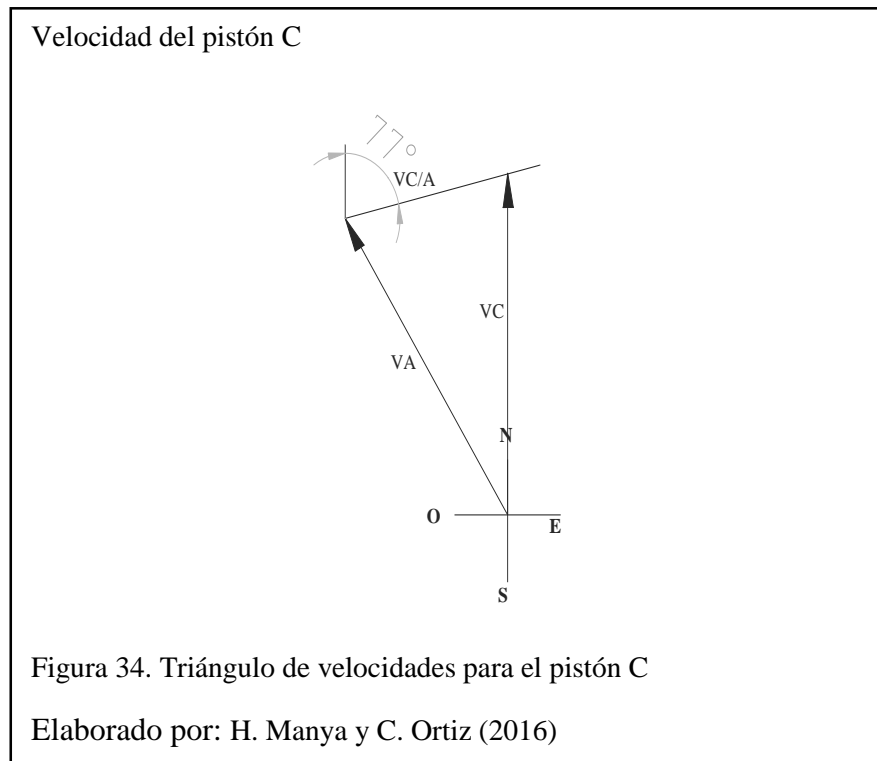
En la Figura 33, se define la posición del mecanismo sin dimensiones para una mejor visualización y el posterior cálculo de las velocidades, y aceleración. El sentido

de giro del mecanismo será anti horario, es decir en sentido contrario a las manecillas del reloj.

3.3. Análisis de velocidades del motor Stirling, método gráfico

Teniendo en cuenta las medidas de los elementos como son pistón, bielas y cigüeñal del motor de combustión interna las tomamos en cuenta para desarrollar como un motor Stirling, se realiza el diagrama cinemático y se procede a realizar análisis de grados de libertad con la Ecuación 1, cálculo de las velocidades y aceleraciones de cada pistón, con las ecuaciones 4, 7, 8 respectivamente, obteniendo que $W = 1$, y $V_A = 6,22 \text{ m/s}$.

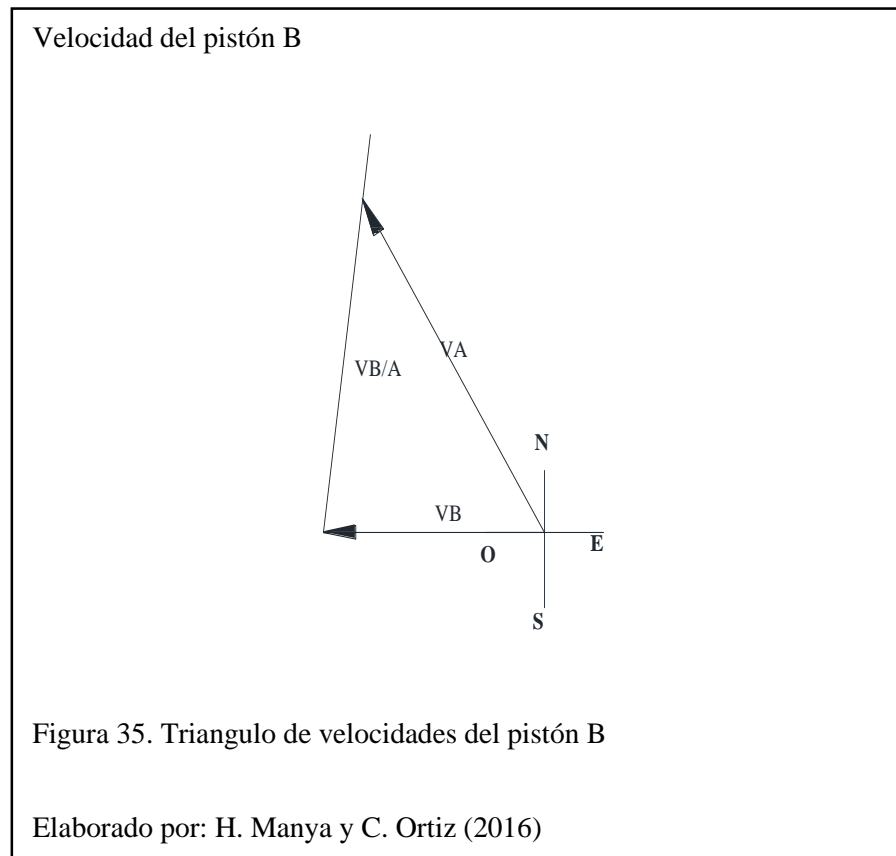
Se realiza el triángulo de velocidades para encontrar las velocidades en cada uno de los pistones, como se muestra en la Figura 34. En el Anexo 24.



De la misma manera como se calculó la velocidad en el punto A, se procede a realizar el cálculo utilizando la Ecuación 4. Obteniendo de esta manera que:

$$V_{C/A} = 3,47 \text{ m/s con dirección N}77^\circ\text{E y } V_C = 6 \text{ m/s con dirección N.}$$

Todos estos resultados son elaborados con el método de velocidades relativas mencionadas en el Capítulo 1.



Para calcular la velocidad del pistón B, se realiza un nuevo triangulo de velocidades donde se relacione la velocidad V_A (Ecuación 4), como se muestra en la Figura 35.

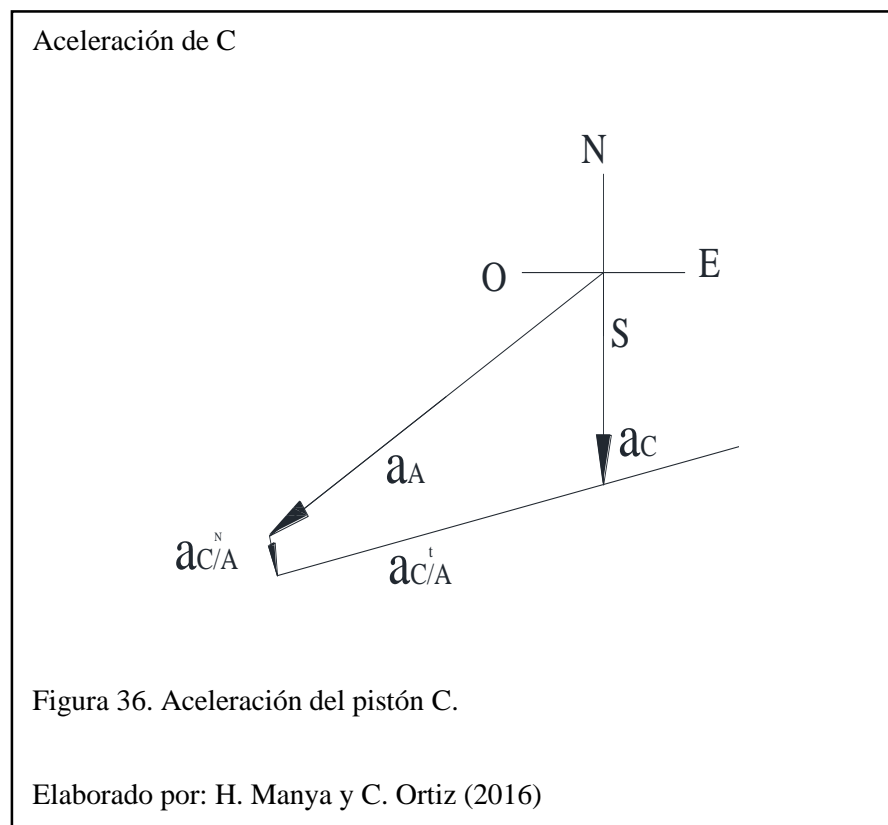
Con esto se obtiene que

$$V_{B/A} = 5,3 \text{ m/s con dirección } N8^\circ E \text{ y } V_B = 4,12 \text{ m/s con dirección } E.$$

3.4. Análisis de aceleración del motor Stirling método gráfico

Se adopta el método de las aceleraciones relativas, en la cual se conoce la aceleración del punto A, y la dirección. Se desea calcular la aceleración del punto B, y para lo cual se utilizará el método de aceleraciones relativas, cuya representación es las ecuaciones 7 y 8.

Como se sabe que la aceleración relativa del punto B respecto a A, $V_{C/A}$ es perpendicular a la línea que une los puntos A y B del eslabón. Teniendo esto en cuenta, se procede a calcular la aceleración como se muestra en la Figura 36.



El resultado de este análisis es:

$$a_{C/A}^N = 91,1 \, m/s^2$$

$$a_C = 514,8 \, m/s^2 \text{ con dirección } S.$$

Se realiza el triángulo de velocidades para encontrar las velocidades en cada uno de los pistones, como se muestra en la Figura 36.

Para calcular la aceleración del pistón B, se realiza un nuevo triángulo de velocidades donde se relacione la aceleración a_A , como se muestra en la Figura 34.

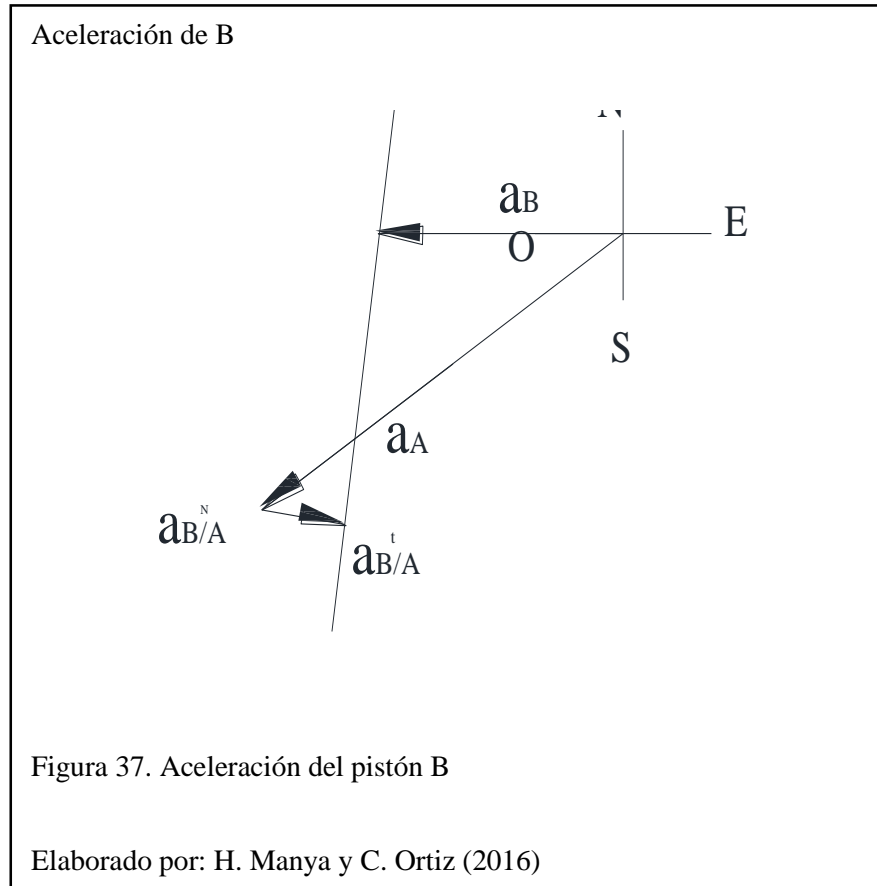
De la misma manera como se calculó la aceleración en el punto B, se procede a realizar el cálculo utilizando las ecuaciones 7 y 8. Obteniendo de esta manera que:

$$a_{B/A}^N = 227,64 \, m/s^2$$

Y

$$a_B = 227,64 \, m/s^2 \text{ con dirección } O.$$

Estos resultados obtenidos en este punto son totalmente iguales a las del motor de combustión interna, con configuración en V 60°, obtenidos en el capítulo 2.



3.5. Deducción de las ecuaciones generales para el análisis de posiciones del motor Stirling

Este mecanismo se representará con los vectores a , b , c , d , e . como se presentó en el Capítulo 2, por ambos lados la suma vectorial de estos dará un valor a 0. El primer eslabón del motor Stirling tipo alfa está situado en la misma posición del motor de combustión interna analizada en la Figura 15. Es decir que realizando el mismo procedimiento de deducción anterior, se encuentra la Ecuación 11 y 12.

No se realizará ninguna modificación en la primera parte de las ecuaciones, por ello el resultado del despeje de la Ecuación 12 da dos soluciones validas correspondientes a los dos circuitos del mecanismo. Por consiguiente para calcular el valor de θ_3 para el segundo circuito del mecanismo se tiene la Ecuación 14.

El desfase en el motor Stirling tipo alfa es de 90° con eso la ecuación, queda de la siguiente manera en la Ecuación 35.

$$\theta_4 = \theta_2 - 90 \quad \text{Ecuación 35}$$

Con ello se aplica nuevamente la Ecuación 10, Pero con los ángulos correspondientes al eje de referencia X' y Y' encontrando la siguiente expresión.

$$a(\cos\theta_4 + j\sin\theta_4) - b(\cos(\theta_5 - 90) - j\sin(\theta_5 - 90)) - c(\cos\theta_6 - j\sin\theta_6) = 0 \quad \text{Ecuación 36}$$

El valor de 90 que aparece en la Ecuación 36 es el ángulo de 90° de desfase del eje de los eslabones.

Separando los componentes real e imaginario

Parte real:

$$a\cos\theta_4 - b\cos(\theta_5 - 90) - c\cos\theta_6 = 0 \quad \text{Ecuación 37}$$

Pero $\theta_6 = 0$

$$a\cos\theta_4 - b\cos(\theta_5 - 90) - e = 0$$

$$e = a\cos\theta_4 - b\cos(\theta_5 - 90) \quad \text{Ecuación 38}$$

Para calcular el valor de θ_6 tomaremos la parte imaginaria de la Ecuación 36.

$$j\sin\theta_4 - j\sin(\theta_5 - 90) - j\sin\theta_6 = 0$$

Pero $\theta_6 = 0$:

$$a \operatorname{sen} \theta_4 - b \operatorname{sen} \theta_4 = 0$$

$$\theta_3 = \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{a \operatorname{sen} \theta_4}{b} \right) + 90 \quad \text{Ecuación 39}$$

Nuevamente el resultado del despeje nos da dos soluciones validas correspondientes a los dos circuitos del mecanismo. Por consiguiente para calcular el valor de θ_5 para el segundo circuito del mecanismo tendremos la expresión.

$$\theta_5 = \pi + 90 - \operatorname{sen}^{-1} \left(\frac{a \operatorname{sen} \theta_2}{b} \right) \quad \text{Ecuación 40}$$

3.6. Análisis de posición del motor Stirling tipo alfa

Ya que se ha logrado deducir la formula general para calcular la posición de los eslabones del motor Stirling tipo alfa en cualquier punto, se utiliza un software matemático (*MATLAB*), para el análisis de la posición, como se puede observar en el Anexo 11.

Los resultados de cada posición de los eslabones c, e y sus pistones respectivos se muestran en la Tabla 4 y en la Figura 38, la trayectoria del mecanismo en un revolución completa.

El cálculo de la Tabla 4 es importante en el presente proyecto, porque en ella se puede ver el comportamiento de los desplazamientos de ambos pistones del motor Stirling tipo alfa, y el ángulo que adopta los ángulos en dichos desplazamientos.

Al comparar la Tabla 4 con las variaciones de posición y ángulo de la cadena cinemática del motor de combustión interna a 60 grados (Tabla 3), se puede apreciar las diferencias y similitudes de las posiciones y ángulos, notándose un desfase de 30

grados, principalmente c y e, ya que estos representan la carrera de los pistones en un ciclo de giro, estos datos obtenidos sirve para el posterior diseño de la manivela con un retraso en 30 grados, como muestra la Figura 44.

Tabla 4. Variaciones de posición y ángulo de la cadena cinemática del motor Stirling tipo alfa.

Angulo de giro θ_2	c (mm)	θ_1 (grados)	e (mm)	θ_5 (grados)
0	155.3000	0	117.7637	16
20	152.7879	5	129.5900	15
40	145.7259	10	140.8708	12
60	135.4140	14	149.7607	8
80	123.6334	15	154.6643	3
100	112.1727	15	154.6643	3
120	102.4140	14	149.7607	8
140	95.1670	10	140.8708	12
160	90.7682	5	129.5900	15
180	89.3000	0	117.7637	16
200	90.7682	5	107.0167	15
220	95.1670	10	98.4469	12
240	102.4140	14	92.6030	8
260	112.1727	15	89.6670	3
280	123.6334	15	89.6670	3
300	135.4140	14	92.6030	8
320	145.7259	10	98.4469	12

Continuación Tabla 4.

340	152.7879	5	107.0167	15
360	155.3000	0	117.7637	16

Nota: Todos los datos tabulados es esta tabla, son generados a partir de las ecuaciones deducidas anteriormente y traducidas al lenguaje del software matemático de MATLAB. Los códigos generados se encuentran en Anexo 11.

(Descripción): Contiene el desplazamiento del pistón B, C y los ángulo de θ_1 , θ_5 con una variación de θ_2 de 20 grados. Tomando como punto de partida el eje X positivo y con el sentido de giro anti horario. La Figura 35 muestra la trayectoria del motor Stirling tipo alfa en un ciclo de giro completo.

Elaborado por: H. Manya y C. Ortiz (2016)

Posición y trayectoria del motor Stirling tipo alfa

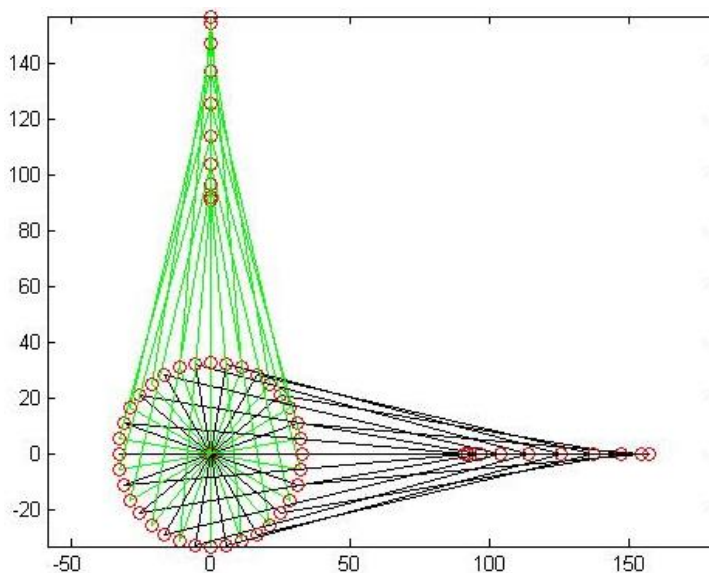


Figura 38. Desplazamiento del pistón y las bielas del motor Stirling tipo alfa.

Elaborado por: H. Manya, y C. Ortiz (2016)

La Figura 38 muestra la posición y trayectoria del mecanismo del motor Stirling tipo alfa en un ciclo completo de giro. Se calculó con el código utilizado en Matlab para calcular los datos de la Tabla 4.

3.7. Análisis de velocidad del motor Stirling por el método algebraico

Velocidad en A (Muñón de la biela)

Esta velocidad y la aceleración del mecanismo del motor Stirling tipo alfa, en este punto es igual a la de motor de combustión interna analizada anteriormente, y al cambiar la velocidad angular estas velocidades no varían en ningún momento, manteniéndose siempre iguales. Anexo 5.

Por ello los resultados son iguales a las calculadas en el Capítulo 2, como están en las figuras 22, 23, 24 respectivamente.

Velocidad en B (pistón B)

Esta velocidad y aceleración en el punto B del motor Stirling tipo alfa, tampoco varían y es igual a la del motor de combustión interna analizada anteriormente, y no tiene componente en el eje Y , estas velocidades no varían en ningún momento, manteniéndose siempre iguales. Como muestra el Figura 23. Anexo 6.

Velocidad en C (pistón C)

A cada posición angular de θ_2 del motor de combustión interna le corresponde una posición, velocidad y aceleración, y no tiene componente en el eje X , puesto que el movimiento se realiza enteramente en el eje Y , por el desfase de 90 grados del

motor Stirling tipo alfa, tomando las ecuaciones deducidas por los autores (Valdés & Macián, 2014, pág. 827)

En el eje X

$$v_{Cx} = 0$$

Ecuación 41

En el eje Y

$$v_{Cy} = -aw \frac{\text{sen}(\theta_4 + \theta_5)}{\cos\theta_5}$$

Ecuación 42

Con la Ecuación 42, se procede a calcular la velocidad en Y del motor Stirling tipo alfa, quedando los resultados en la Figura 39. Que se ha realizado mediante los códigos generados con las ecuaciones antes mencionadas y traducidas al lenguaje de Matlab como se observa en el Anexo 12.

Velocidad del pistón C del motor Stirling tipo alfa

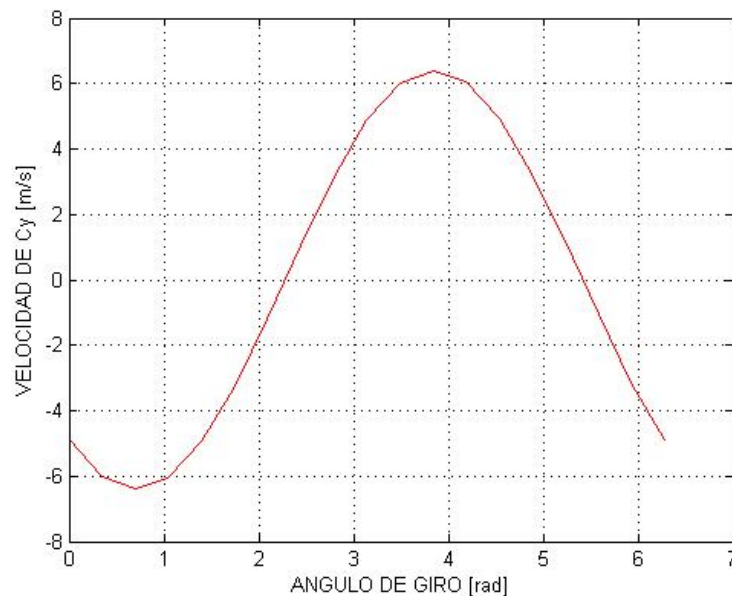


Figura 39. Velocidad del pistón C.

Elaborado por: H. Manya y C. Ortiz (2016)

Como solamente se ha podido ver que la velocidad en el punto C es un valor diferente a la del motor de combustión interna, se procede a calcular la aceleración en este punto.

Esto sucede porque en realidad el motor de combustión interna a 60 grados varia 30 grados solo en unos de sus cilindros como se puede ver al comparar las figuras 15 y 32, por ello es necesario realizar el rediseño de la manivela para que compense este desfase de 30 grados, para lograr el movimiento del motor Stirling tipo alfa en el motor de combustión interna, como muestra la Figura 40.

3.8. Análisis de aceleración del motor Stirling por el método algebraico

Aceleración en “A” y “B”

Las aceleraciones en el punto A, B, del motor de combustión interna y el motor Stirling también permanecen iguales, y no varía al transcurrir el movimiento del mecanismo, por ello solamente nos referimos a las figuras 27, 28, 29 como resultado de las aceleraciones del punto A y el punto B.

Esto sucede porque se tomó el punto de referencia a este punto A, B como si estuvieran superpuestas, y con el mismo punto de referencia O, como se puede observar en las figuras 15 y 32.

Aceleración en C (pistón C)

El análisis de la aceleración en C se realiza tomando en cuenta la desviación de 90^0 que tienen los pistones uno respecto al otro.

Por ello se adopta la Ecuación 43 y 44, analizadas para el cálculo de la aceleración en el punto B y se agrega la respectiva desviación de 90^0 . Por la configuración adoptada según la Figura 30.

Con ello se puede calcular la aceleración de Pistón C y en cada instante de giro. Nótese que la θ_5 , será proporcionalmente igual a θ_1 , pero en un ángulo de 90^0 . Con estas apreciaciones ya se puede calcular aceleración en Y con la ayuda del programa Matlab. Como se observa en la Figura 40.

$$a_{Cx} = 0 \quad \text{Ecuación 43}$$

En el eje Y

$$a_{Cy} = -aw^2 \left(\frac{\cos(\theta_4 + \theta_5)}{\cos\theta_5} + \frac{a\cos^2\theta_4}{ccos^3\theta_5} \right) \quad \text{Ecuación 44}$$

Aceleración del pistón C del motor Stirling tipo alfa

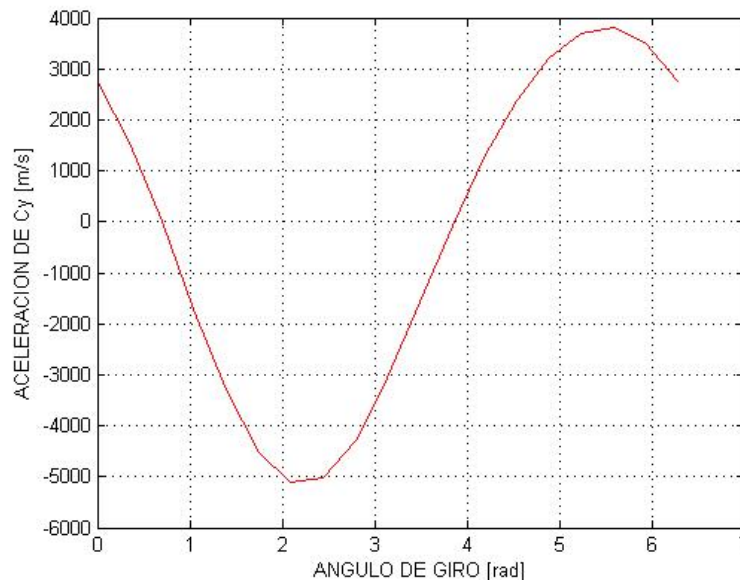


Figura 40. Aceleración del pistón C.

Elaborado por: H. Manyá y C. Ortiz (2016)

La Figura 40 se ha realizado mediante los códigos generados con las ecuaciones 43 y 44 antes mencionadas y traducidas al lenguaje de Matlab como se observa en el Anexo 13.

3.9. Conclusión del capítulo

Al realizar los cálculos en el capítulo 2 y 3, se concluye que en el motor Stirling tipo alfa hay un retraso de 30 grados, en desplazamiento del pistón C que se representa con la letra e , velocidad, aceleración con respecto al motor de combustión interna de la motocicleta. Es decir que la posición que tiene el pistón C del motor Stirling tipo alfa en 30 grados, el pistón C del motor de combustión interna de motocicleta la tendrá cuando este a 0 grados. Estas conclusiones se puede observar mejor en la Tabla 5.

Con estos resultados se puede decir que el motor de combustión interna y el motor Stirling son compatibles para adaptar sus cinemáticas.

Capítulo 4

Diseño de los elementos del motor de combustión interna en v de 60° para adquirir la cinemática del motor Stirling tipo alfa

En el presente capítulo se busca rediseñar el mecanismo según las diferencias y semejanzas notadas en los cálculos de los capítulos 2 y 3.

Los resultados de las posiciones y velocidades de los puntos A, B, C, obtenidos dan un retraso de 30 grados del pistón C del motor Stirling con respecto al motor de combustión interna como se puede ver en la Tabla 5, con esta comparación se diseñará un nuevo eje de adaptación para el muñón de la biela y corregir este adelantamiento.

El único diseño nuevo que surge a partir de los cálculos de los capítulos 2 y 3 es el eje de adaptación para el muñón de la biela, porque con ello se soluciona el problema de retraso mostrado en la Tabla 5 del pistón C en 30 grados como se observa en las figuras 43 y 44.

En la Figura 45 se resalta con el color verde el eje de adaptación para el muñón de la biela con el fin de observar como interactúa con el conjunto diseñado.

Los demás elementos como el pistón, biela, cigüeñal, pasadores, han sido elaborados a partir de las medidas tomadas del motor de combustión interna de la motocicleta tomadas en el taller (anexos 1 y 2) con el fin de poder diseñar el mecanismo para la simulación del movimiento. Se toma en cuenta los materiales con los que están contruidos para realizar el análisis de fatiga del eje de adaptación.

Tabla 5. Tabla comparativa del desplazamiento del pistón C del MCI, y el motor Stirling tipo alfa

MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA			MOTOR STIRLING TIPO ALFA	
Angulo de giro θ_2	e (mm)	θ_5 (grados)	e (mm)	θ_5 (grados)
0	135.4140	14	117.7637	16
10	140.8708	12	123.6334	15
20	145.7259	10	129.5900	15
30	149.7607	8	135.4140	14
40	152.7879	5	140.8708	12
50	154.6643	3	145.7259	10
60	155.3000	0	149.7607	8
70	154.6643	3	152.7879	5
80	152.7879	5	154.6643	3
90	149.7607	8	155.3000	0
100	145.7259	10	154.6643	3
110	140.8708	12	152.7879	5
120	135.4140	14	149.7607	8
130	129.5900	15	145.7259	10
140	123.6334	15	140.8708	12
150	117.7637	16	135.4140	14
160	112.1727	15	129.5900	15
170	107.0167	15	123.6334	15

Continuación Tabla 5.

180	102.4140	14	117.7637	16
190	98.4469	12	112.1727	15
200	95.1670	10	107.0167	15
210	92.6030	8	102.4140	14
220	90.7682	5	98.4469	12
230	89.6670	3	95.1670	10
240	89.3000	0	92.6030	8
250	89.6670	3	90.7682	5
260	90.7682	5	89.6670	3
270	92.6030	8	89.3000	0
280	95.1670	10	89.6670	3
290	98.4469	12	90.7682	5
300	102.4140	14	92.6030	8
310	107.0167	15	95.1670	10
320	112.1727	15	98.4469	12
330	117.7637	16	102.4140	14
340	123.6334	15	107.0167	15
350	129.5900	15	112.1727	15
360	135.4140	14	117.7637	16

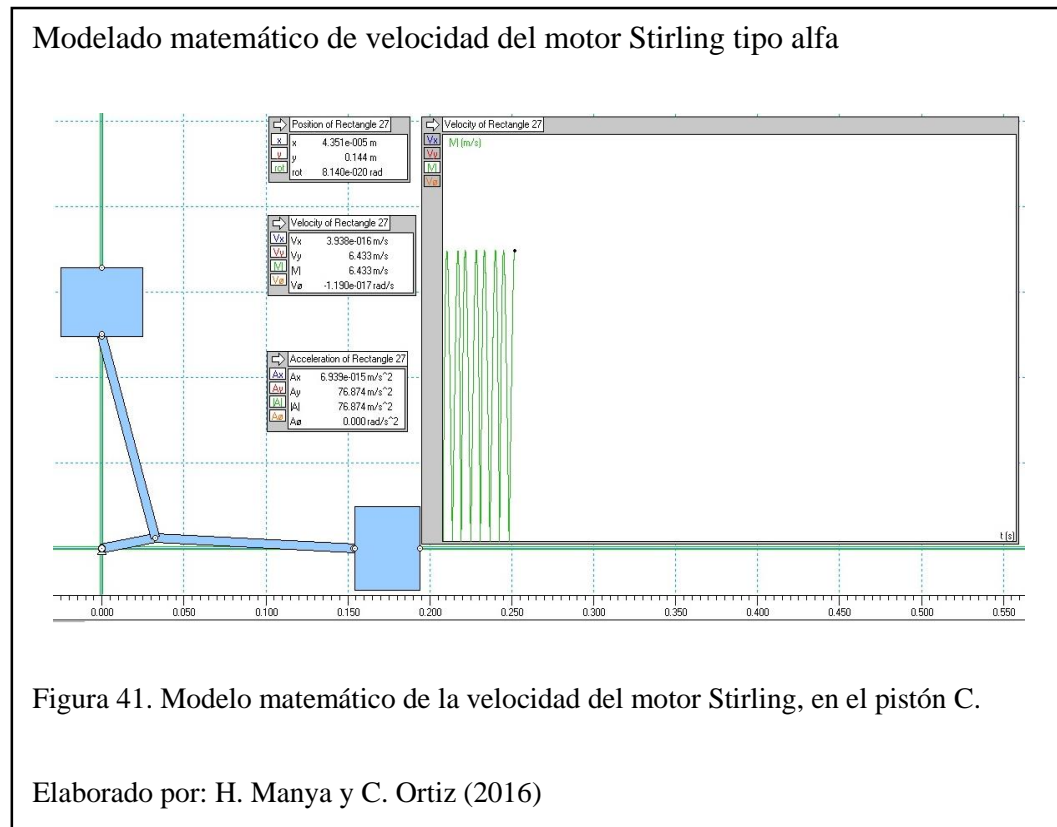
Nota: Todos los datos tabulados en esta tabla, son generados a partir de las ecuaciones deducidas anteriormente y traducidas al lenguaje del software matemático de MATLAB. Los códigos generados se encuentran en los Anexos 3, 4 y 11.

Elaborado por: H. Manya y C. Ortiz (2016)

Se ha considerado solamente la carrera del pistón C (e) en ambos motores, porque el desplazamiento, velocidad y aceleración del pistón B del motor Stirling tipo alfa es igual al del pistón B del motor de combustión interna que se está analizando.

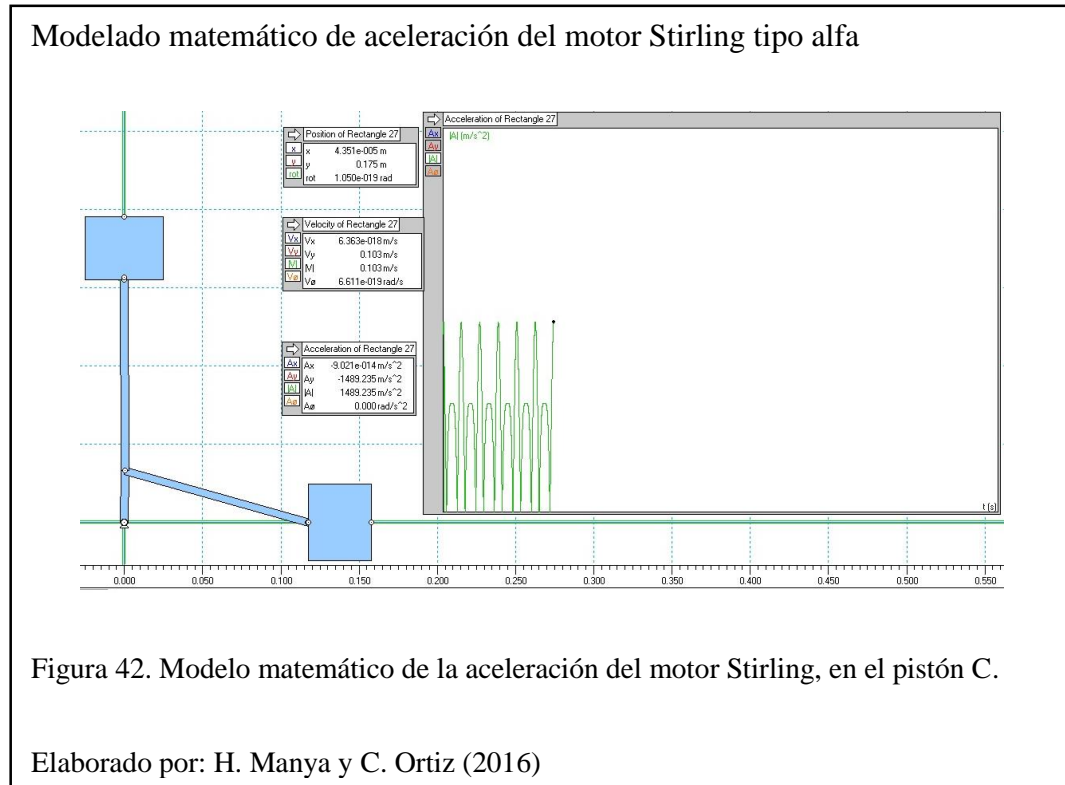
4.1. Modelo matemático para el diseño

Las figuras 41 y 42, detalla los datos del movimiento y velocidad del Motor Stirling tipo alfa, que la nueva configuración del motor de combustión interna de la motocicleta debería tener, para compensar el retardo de 30 grados. Estos resultados están tabulados en el software Working model, Matlab, Inventor y gráficamente resuelto en los capítulos anteriores. Con estos resultados obtenidos se procede a corregir el desfase del motor de combustión interna en 60 grados, en 30 grados para lograr obtener el movimiento del motor Stirling tipo alfa.



La Figura 42 detalla los datos de aceleración del Motor Stirling tipo alfa, que la nueva configuración del motor de combustión interna de la motocicleta debería tener, para compensar el retardo de 30 grados.

Se puede observar que:



Se realiza el rediseño del cigüeñal y todos sus componentes, tomando en cuenta las tablas 3, 4 y 5, observando que el desplazamiento varia en 30 grados, así mismo comparando las velocidades y aceleraciones del motor de combustión interna, y el motor Stirling desarrollados en los capítulos 2 y 3. Todos estos ítems se desfasan en 30 grados.

Para compensar este desfase y lograr que el movimiento motor de combustión interna adopte el movimiento del motor Stirling tipo alfa, se tendrá que adelantar una de las bielas, en nuestro caso la biela número 2 o del pistón C en un ángulo de 30°, por medio de una manivela especialmente diseñada para este desfase como se muestra en la Figura 43.

Con esta configuración compensamos este retraso de 30° , y podemos proceder a diseñar todos los componentes. Las figuras 44 y 45 muestra la configuración de cómo quedaría el motor de combustión interna con el eje de adaptación diseñado.

Manivela diseñada para obtener la cinemática del motor Stirling tipo alfa en un motor de combustión interna

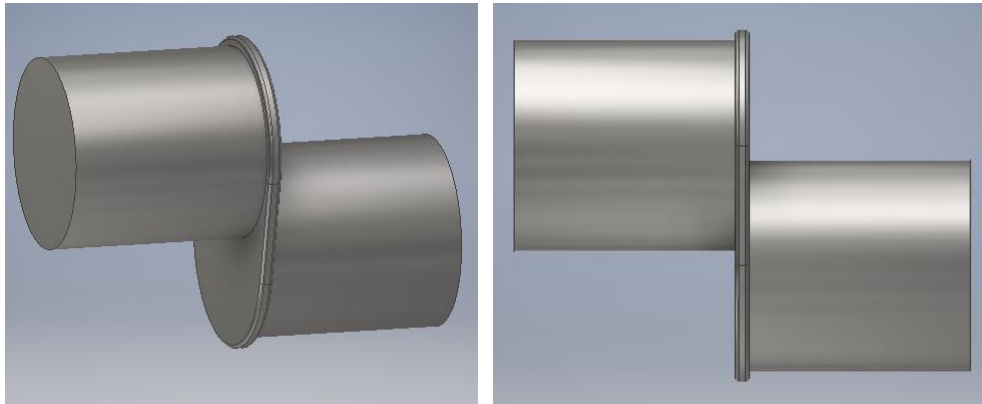


Figura 43. Nueva manivela diseñada para obtener el movimiento del motor Stirling tipo alfa en un motor de combustión interna con configuración en V a 60 grados.

Elaborado por: H. Manya y C. Ortiz (2016)

Las figuras 44 y 45 muestra la configuración de cómo quedaría el motor de combustión interna con el eje de adaptación diseñado.

Dos configuraciones de los pistones y las bielas

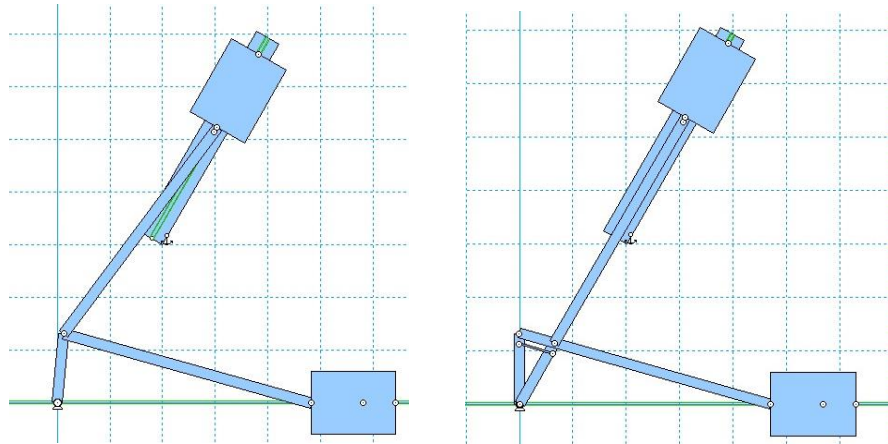


Figura 44. Configuración al diseñar la manivela para un desfase de 30 grados.

Elaborado por: H. Many y C. Ortiz (2016)

Vista de como interactúa el eje diseñado en Inventor en el conjunto del cigüeñal y la biela

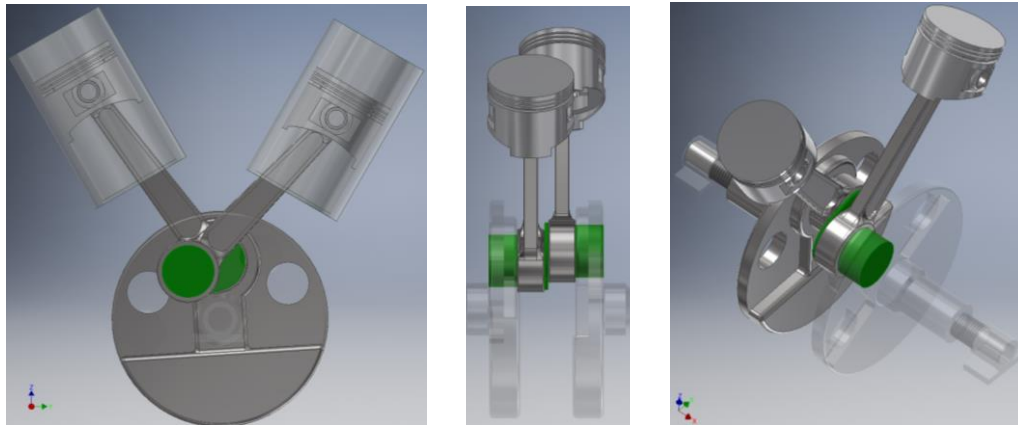


Figura 45. Vista frontal, lateral y vista isométrica del eje del muñón de la biela con desfase de 30 grados

Elaborado por: H. Many y C. Ortiz (2016)

4.2. Movimiento del pistón – cigüeñal

El movimiento del pistón, las bielas y el cigüeñal del motor de combustión interna, adquiere todas las variables del motor Stirling tipo alfa con el desfase de 30 grados.

4.3. Diseño de elementos constructivos

4.3.1. Análisis de esfuerzo y deformación de la manivela para adaptación

Las presiones aplicadas para el análisis de esfuerzos y deformación son las presiones P_3 y P_4 calculadas en la sección 2.12., estos valores son debido al ciclo Otto. Se utilizará el software de diseño Inventor, como se muestra en la Figura 45.

Presiones actuantes en los pistones

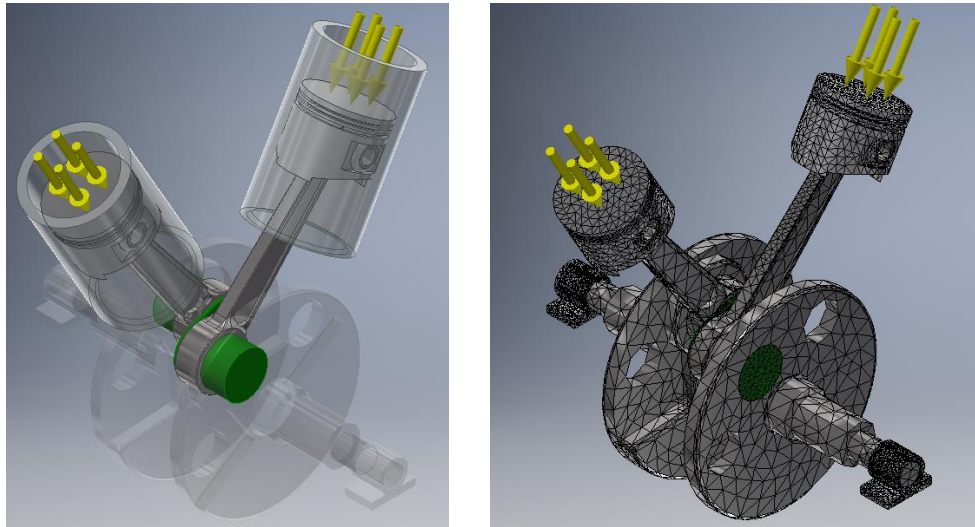


Figura 46. Ilustración de las fuerzas que actúan en el conjunto de motor

Elaborado por: H. Manyá y C. Ortiz (2016)

Para una mejor visualización de las fuerzas que actúan sobre el eje de adaptación de la Figura 3, se desactiva la visibilidad de todos los componentes, ya

que estos pueden obstruir u ocultar fuerzas críticas importantes para el análisis. Y se procede a elaborar las fuerzas resultantes como se muestra en la Figura 47.

Material utilizado para el diseño de la manivela o eje para adaptación

El material utilizado para este elemento, es acero fundido con pulido superficial. Con las características descritas en la Tabla 6.

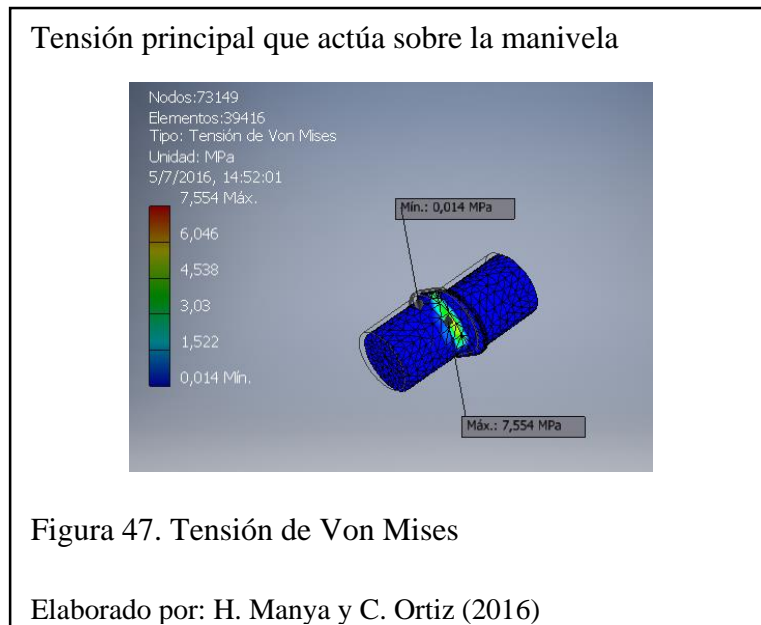
Tabla 6. Propiedades del material utilizado para fabricar la manivela o eje de adaptación.

Nombre	Acero, carbono	
General	Densidad de masa	7,85 g/cm ³
	Límite de elasticidad	350 MPa
	Resistencia máxima a tracción	420 MPa
Tensión	Módulo de Young	200 GPa
	Coefficiente de Poisson	0,29 su
	Módulo cortante	77,5194 GPa
Nombre(s) de pieza	Manivela o eje para adaptación	

Nota: Propiedades del material para cálculo de esfuerzos y deformaciones.

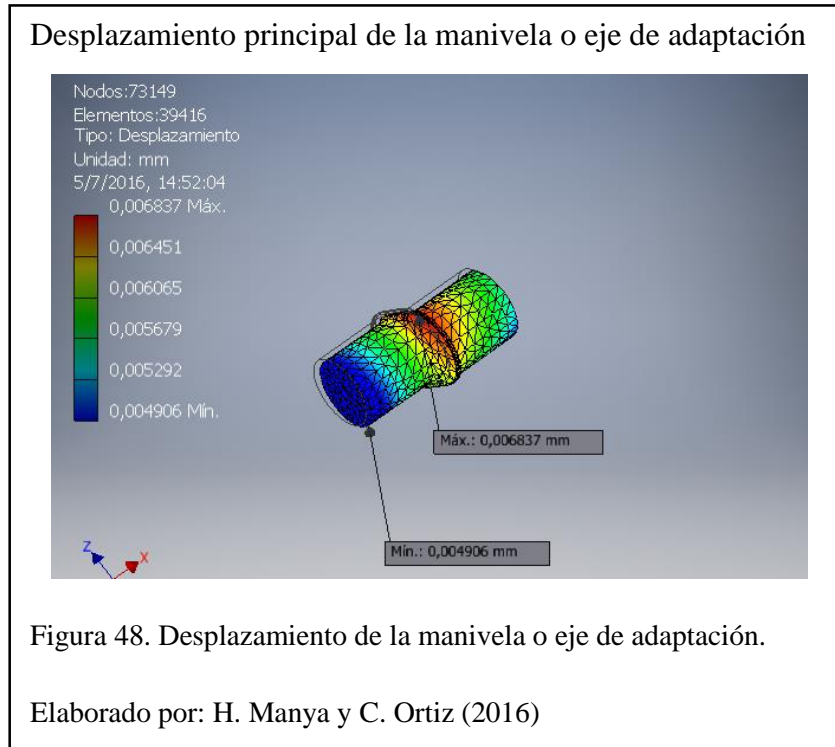
Elaborado por: H. Manya y C. Ortiz (2016)

Tensión de von mises

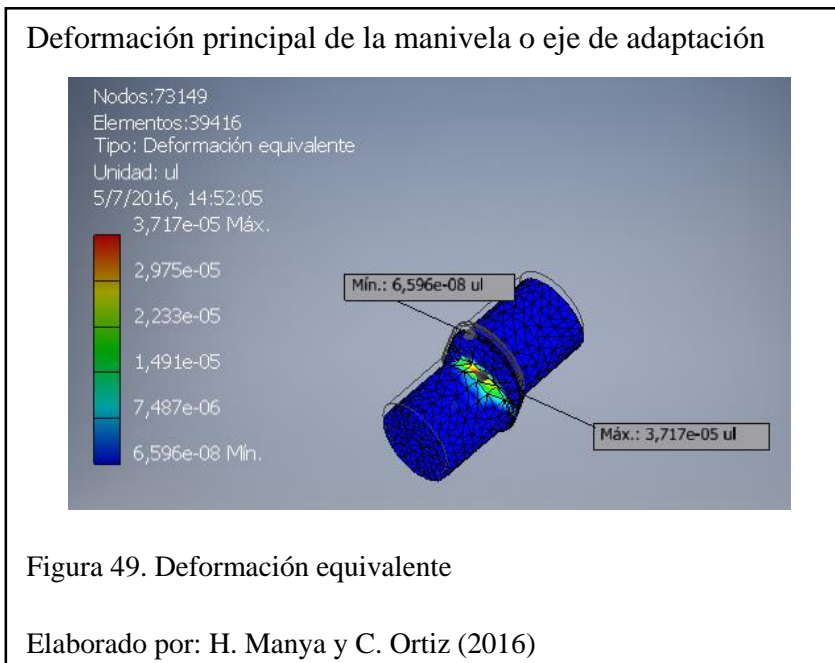


Desplazamiento

El desplazamiento también es insignificante, como muestra la Figura 48.

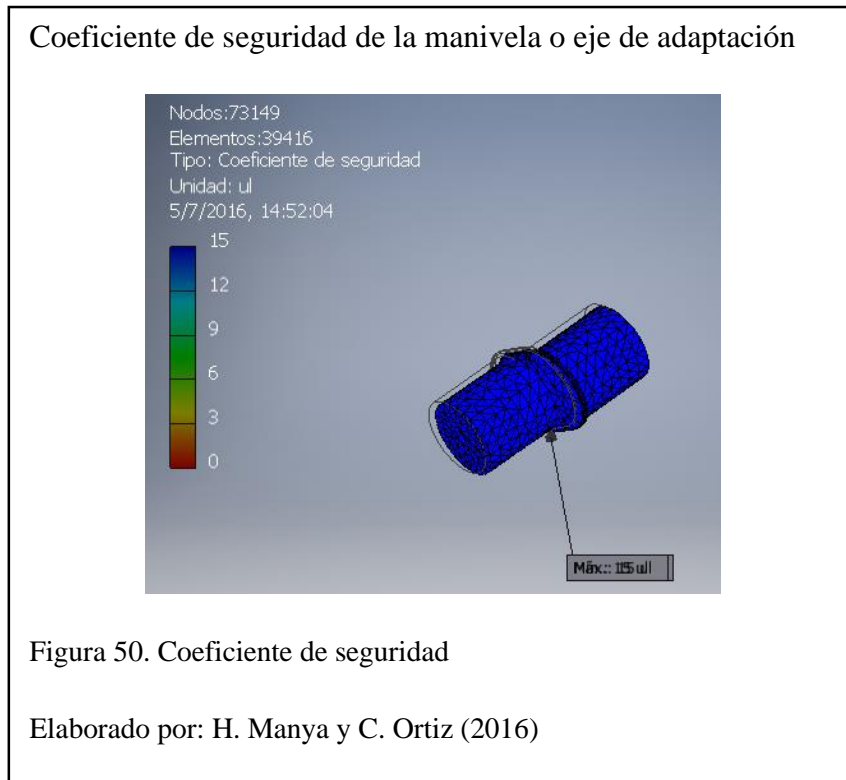


Deformación



Coefficiente de seguridad

Resulta que el coeficiente de seguridad con el material seleccionado en la Tabla 6 y con las presiones aplicadas es 15, como muestra la Figura 50.



4.3.2. Pistón

El pistón se ilustra como un elemento informativo mas no para diseño. Solamente se ha hecho el boceto a partir de las medidas tomadas del motor original en la sección Anexo 1 y 2.

Los materiales recomendados según los autores (Luján & Bermúdez, 2014, pág. 877) que se utilizan normalmente para la fabricación de los pistones se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7: Aleaciones combinadas en pistones de aluminio de motores

Material	%
Silicio	11 – 19
Cobre	0,8 – 4
Magnesio	0,8 – 1,2
Níquel	0,8 – 3
Hierro	$\leq 0,7$

Nota: Varias aleaciones de aluminio utilizado para la línea de motores

Fuente: (Luján & Bermúdez, 2014, pág. 877)

Modelado pistón en programa de diseño

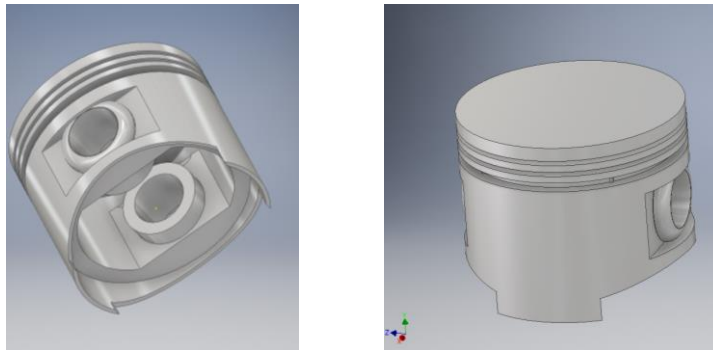


Figura 51. Vista isométrica del pistón, sin escala

Elaborado por: H. Manya y C. Ortiz (2016)

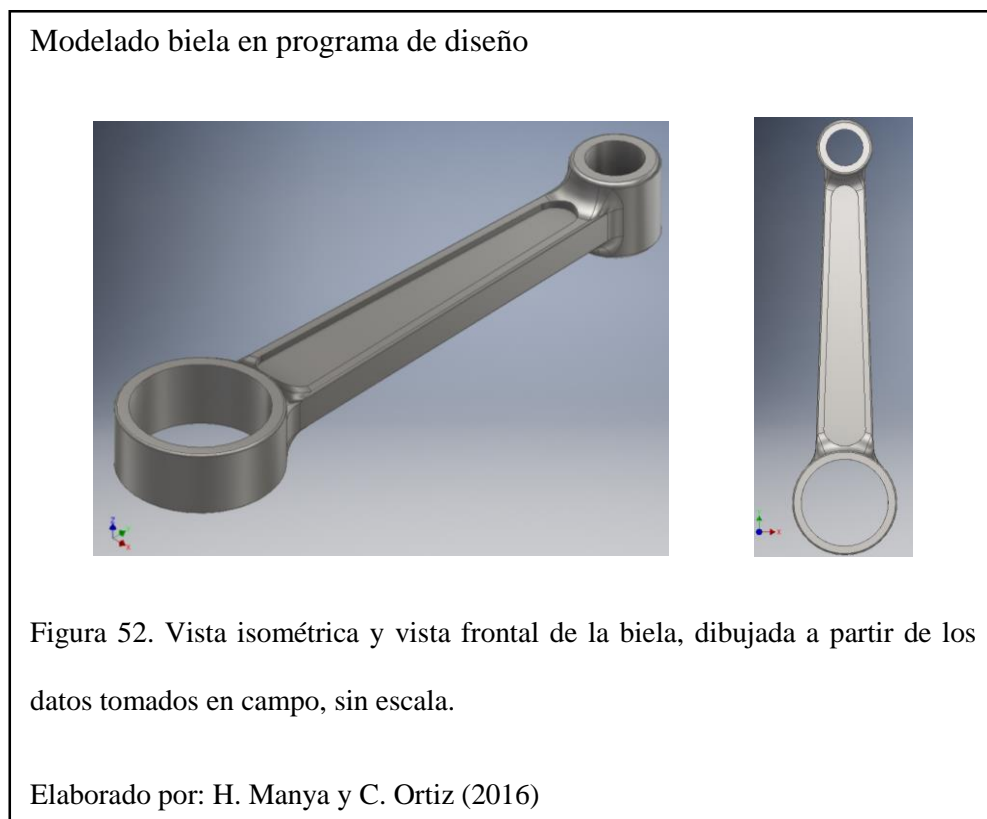
4.3.3. Biela

Se utilizará la biela del motor original de la Figura 52. Solamente se ha hecho el boceto a partir de las medidas tomadas del motor original en la sección anexos.

Con el fin de poder simular la adaptación de la manivela o eje para adquirir la cinemática estudiada.

La biela, transmite los esfuerzos generados por los gases de combustión sobre el pistón hacia la manivela o muñón del cigüeñal y viceversa y está sometida a su vez a varios otros esfuerzos mecánicos, y debe ser capaz de resistirlo sin deterioro ni deformación, se diseña con el fin de alcanzar la mayor rigidez posible con una masa pequeña para disminuir las fuerzas de inercia. (Luján & Bermúdez, 2014, pág. 886)

Figura 52 muestra la disposición en el programa de diseño de la biela.



Los materiales que normalmente se utilizan en la construcción de las bielas la describe la Tabla 8. Pero para nosotros no es necesario ya que se cuenta con esta biela.

Tabla 8: Propiedades mecánicas de los materiales utilizados en las bielas

Material	Módulo de Young (MPa)	Límite de fatiga (MPa)	Límite de fluencia (MPa)	Límite de tracción (MPa)	Densidad (g/cm ³)
Fundición	170000	200	410	750	7,20
Acero al carbono	210000	320	550	900	7,85
Acero aleado (Cr/Mo)	210000	480	800	1050	7,85
Aleación Ti–Al	128000	225	1000	1080	4,50

Nota: Propiedades de las bielas para cálculo de esfuerzos y deformaciones.

Fuente: (Luján & Bermúdez, 2014, pág. 893)

4.3.4. Cigüeñal

El cigüeñal que se va a utilizar es la del mismo motor, porque este elemento tiene todos los estudios realizados y fabricados. Solamente se ha hecho el boceto a partir de las medidas tomadas del motor original en la sección Anexo 1 y 2. Con el fin de poder simular la adaptación de la manivela o eje para adquirir la cinemática estudiada.

Los materiales que normalmente se utilizan en la construcción de las bielas la describe la Tabla 9.

Pero para nosotros no es necesario ya que se cuenta con este cigüeñal.

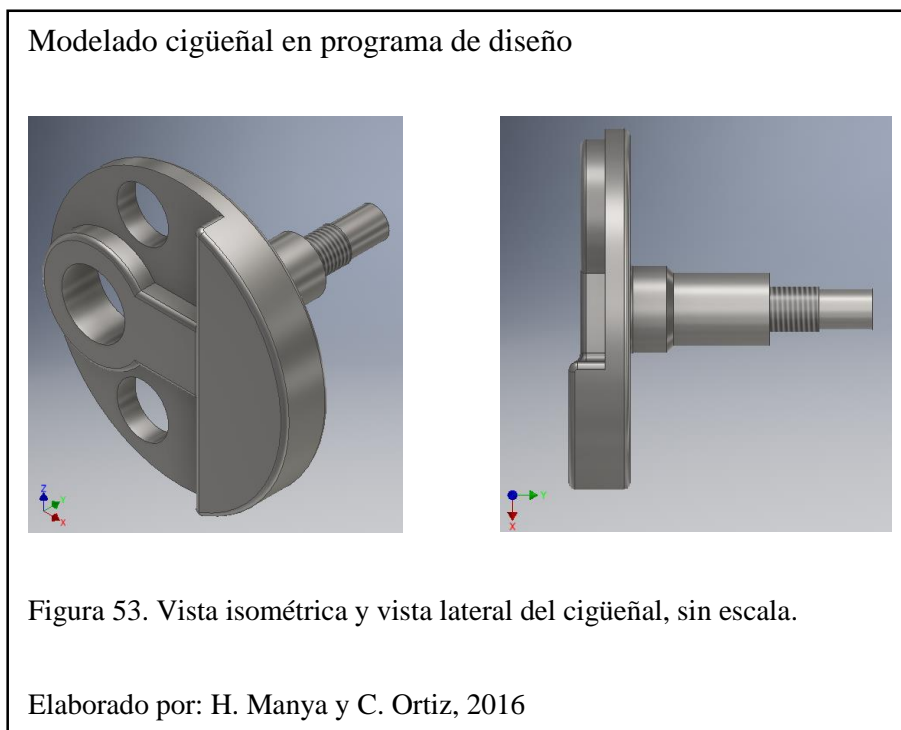
Tabla 9: Propiedades mecánicas de dos materiales muy utilizados en los cigüeñales

Material	Módulo de Young (MPa)	Límite de elasticidad (MPa)	Límite de tracción (MPa)
Fundición	180	420	700
Acero al carbono	210	550	950

Nota: Varias aleaciones que se puede realizar en los cigüeñales

Fuente: (Luján & Bermúdez, 2014, pág. 897)

El cigüeñal transforma el movimiento lineal del pistón en movimiento circular o rotacional, a través de la biela y el muñón o manivela, Figura 53.



La condiciones de operación del cigüeñal se especifica en la Tabla 10, como ya se tiene el elemento fabricado no se realizará ninguna análisis de esfuerzos, fatiga y deformación.

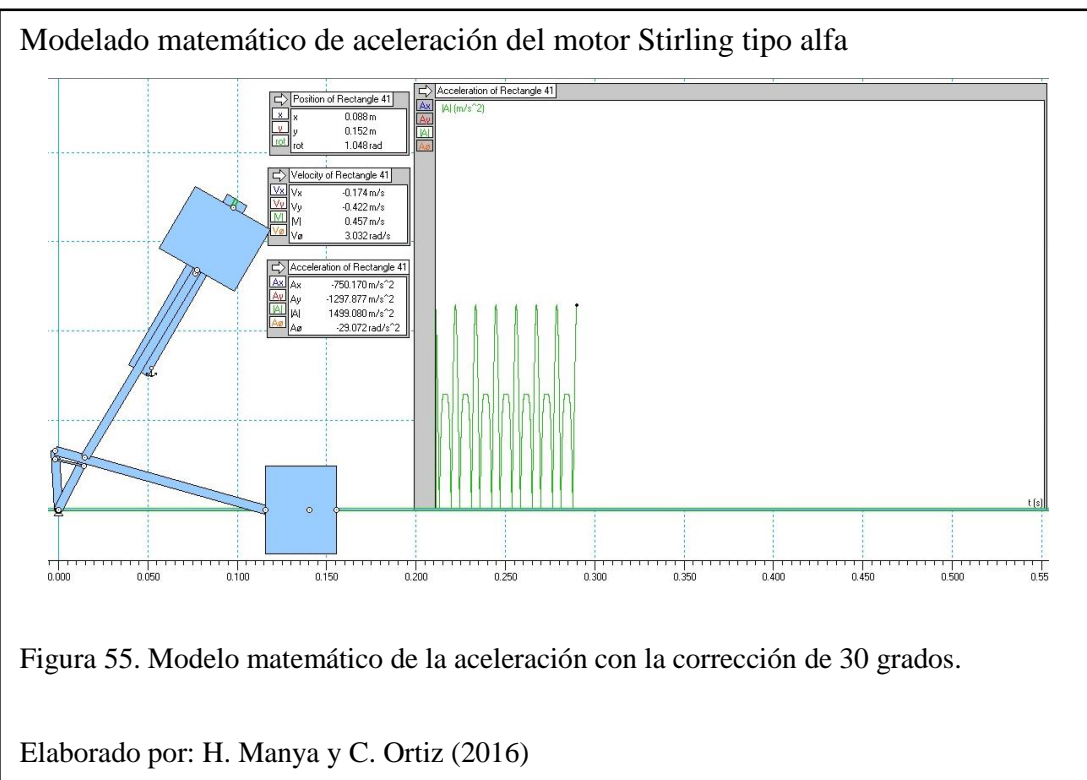
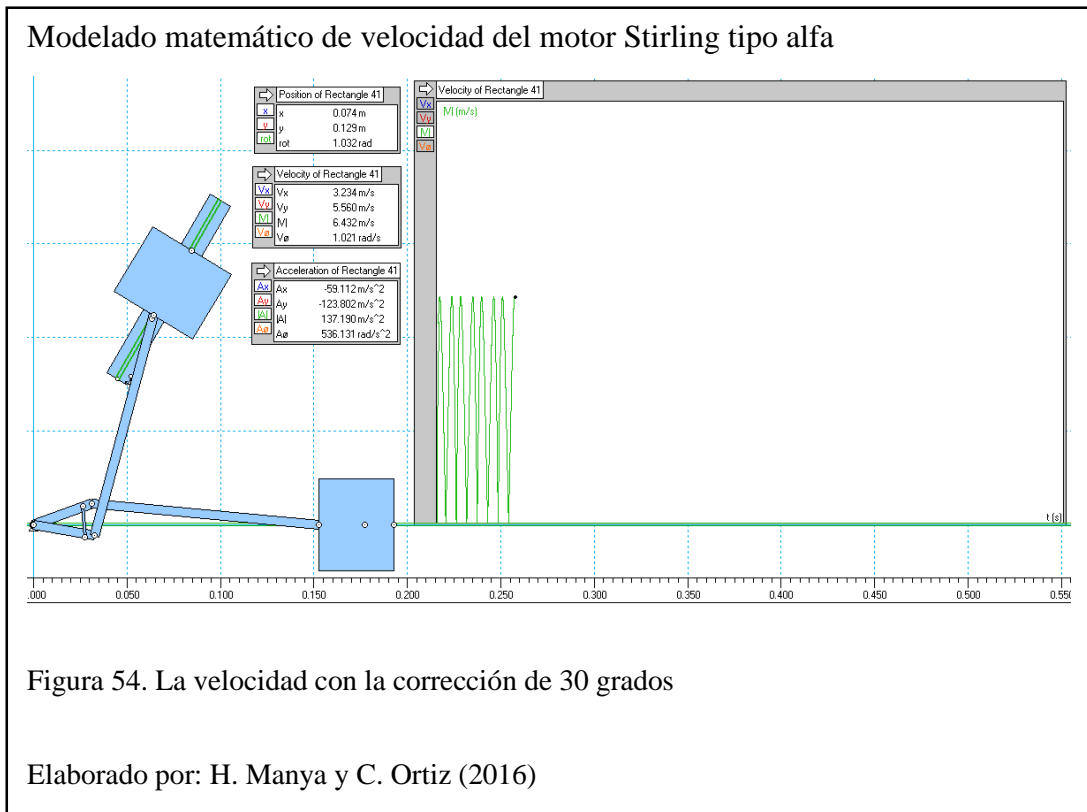
Tabla 10: Condiciones de operación de los cojinetes y dimensiones

Punto montaje	Velocidad lineal (m/s)	Carga específica (MPa)	Relación L/D
Pie de biela	< 3	70 – 120	<1
Cabeza de biela	10 – 18	50 – 90	0,28 – 0,35
Apoyo bancada	12 – 20	40 – 60	0,25 – 0,32

Nota: Propiedades del material de un cigüeñal para cálculo de esfuerzos y deformaciones.

Fuente: (Luján & Bermúdez, 2014, pág. 898)

4.4. Análisis de resultados



Al adelantar el pistón B, en 30 grados con el eje de adaptación para el muño de la biela como muestra las figuras 44 y 45, se obtiene los datos tabulados en las figuras 54 y 55, donde se obtuvieron los mismos resultados de la figuras 41 y 42, pero con el adelanto del pistón B en 30 grados.

Esto quiere decir que se ha corregido el desfase de 30 grados que existía entre el motor de combustión interna de configuración en V a 60 grados con el motor Stirling tipo alfa.

Capítulo 5

Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

- Se conoció las características principales del motor Stirling tipo alfa que consta de dos pistones y su principal característica es que los pistones están ubicados a 90 grados uno con respecto al otro, y sus cilindros conectados entre sí con un regenerador entre ellos.
- Se estudió las características principales del motor de combustión interna cuyos pistones están ubicados a 60 grados, uno del otro, generando por ende una cinemática diferente al de motor Stirling.
- Con la realización de los cálculos analíticos y la ayuda del software Matlab, Working Model e Inventor se logró analizar que los resultados del movimiento cinemático del motor Stirling con respecto al del motor de combustión interna en V, tienen un desfase de resultados tanto de velocidades como aceleraciones en un ángulo de 30° , por lo cual se decidió diseñar un nuevo cigüeñal con el objetivo de retrasar el pistón C en 30° dándonos así la misma configuración del motor Stirling y obteniendo la misma cinemática.
- Para realizar la validación y comprobar que el diseño del nuevo cigüeñal funciona en óptimas condiciones se realizó la simulación en algunos programas ya mencionados como Inventor y Working Model, obteniendo con ello resultados satisfactorios, de la misma cinemática, velocidades y aceleraciones que el motor Stirling.

- Se analizó la cinemática del motor Stirling tipo alfa, y la del motor de combustión interna, por el método gráfico, el método analítico, programa MATLAB, Working Model, Inventor profesional, con el fin evitar caer en el error, cuando se calculó la posición, velocidad y aceleración. Los resultados obtenidos por todos los métodos dieron los mismos resultados, corroborando la exactitud de los cálculos.
- Al realizar el adelantamiento del pistón B en el motor de combustión interna con la nueva manivela, se corrigió los desfases que existían entre el motor de combustión interna y el motor Stirling tipo alfa, llegando a adquirir la misma cinemática entre ambos tipos de motores.
- Como el presente proyecto de titulación se limita al análisis cinemático, no se calcula otras variables, como por ejemplo vibraciones, equilibrio de fuerzas, balanceo, etc., salvo el análisis del ciclo termodinámico hecho mediante la relación $P - v$ del ciclo Otto, para obtener las fuerzas que provocaban el movimiento del pistón en el motor de combustión interna.

5.2. Recomendaciones

- Analizar la parte dinámica y termodinámica de estos motores mencionados con el fin de llegar a construir un modelo útil y eficiente.
- Realizar la construcción de un prototipo a partir de este proyecto porque es un motor sumamente amigable con el ambiente.
- Para el análisis termodinámico tomar un gas que reaccione bruscamente con cambios mínimos de temperatura, y profundizar en el análisis del regenerador del motor Stirling tipo alfa, a fin de llegar a construir un prototipo eficiente.

Referencias

Álvarez Flóres, J. A., & Callejón Agramunt, I. (2002). *Máquinas Térmicas Motoras*. Barcelona: Ediciones UPC.

Arpem Networks, S.L. (2016). *Arpem.com*. Recuperado el 05 de 04 de 2016, de <http://www.arpem.com/imagenes/ficha/6/9/5/6/kawasaki-z-750-lateral-derecho-4.jpg>

CB, P. (06 de 02 de 2012). *Tenología*. Recuperado el 07 de 04 de 2016, de <https://tecnoapostol.wordpress.com/2012/02/06/el-motor-de-4-tiempos/>

Cengel, Y., & Boles, M. (2006). *Termodinámica*. Mexico D.F.: McGraw Hill.

Crowe Computer Services. (06 de 09 de 2015). *The Kneeslider*. Recuperado el 30 de 03 de 2016, de <http://thekneeslider.com/bad-dog-215-cubic-inch-v-twin/>

Honda "The power of dreams". (15 de 03 de 2016). *Honda*. Recuperado el 04 de 05 de 2016, de <http://www.honda.es/motorcycles/range/sport-touring/vfr800f-2014/overview.html>

Honda Motor Argentina. (2011). *HONDA*. Recuperado el 05 de 04 de 2016, de <http://motos.honda.com.ar/>

International, D. N. (Dirección). (2016). *Como funciona: Motor de 4 tiempos* [Película].

Keeway Motor. (2011). *KEEWAY*. Recuperado el 03 de 06 de 2016, de <http://www.keeway.mx/31/69/productos/motocicletas/customs/2015/keeway/orado-250/>

- Luján, J., & Bermúdez, V. (2014). Elementos Constructivos. En F. Payri , & J. Desantes, *Motores de Combustion interna alternativos* (págs. 855-912). Barcelona: UPV.
- Motoscoting Web S.L. (31 de 03 de 2016). *Motofichas.com*. Recuperado el 06 de 04 de 2016, de <http://www.motofichas.com/marcas/keeway/cruiser-250-efi#>
- Norton, R. (2009). *Diseño de Maquinaria*. Worcester, Massachusetts: Mc Graw Hill.
- Norton, R. L. (2009). *Diseño de Maquinaria*. Mexico D.F.: McGraw Hill.
- Sanchez Sanchez, R. (2008). *Ampliación de análisis cinemático de mecanismos planos mediante métodos analíticos*. Huelva: Universidad de Huelva.
- Shigley, J. E., & Uicker, J. J. (2001). *Teoría de Máquinas y Mecanismos*. Mexico D.F.: Mc Graw Hill.
- Simple Machines Forum. (s.f.). *Wildgoose Chase Moto Guzzi*. Recuperado el 29 de 04 de 2016, de www.wildguzzi.com
- Suzuki Motor de Colombia S.A. (25 de 03 de 2016). *Suzuki*. Recuperado el 30 de 03 de 2016, de http://www.suzuki.com.co/sites/default/files/styles/carrusel_n2_w1019_h400/public/motos/negra_3.png?itok=n3mRlaeX
- Valdés, M., & Macián, V. (2014). Cinemática, dinámica y equilibrado. En F. Payri, & J. Desantes, *Motores de Combustión interna Alternativos* (págs. 824-853). Barcelona: UPV.

Anexos

Anexo 1. Fotografías de la motocicleta escogida para el presente proyecto



Vista frontal de motocicleta Keeway



Vista lateral de la motocicleta Keeway



Vista posterior de motocicleta Keeway



Logotipo de la marca Keeway en manubrio

Anexo 2. Fotografías del motor de combustión interna con configuración en V a 60 grados

grados



Vista lateral del motor en V, Keeway



Vista posterior de motor



Cilindraje de motor 1400 cm³



Vista lateral de ubicación de pistones

Imágenes del mecanismo del motor de combustión interna en V de 60°

Anexo 3. Fotografías de los elementos que conforman el mecanismo biela manivela

PISTON



Vista inferior



Vista Superior



Vista frontal



Vista lateral

Pistón utilizado para realizar el análisis cinemático del motor.

Anexo 4. Fotografías de los elementos que conforman el mecanismo biela manivela
(Biela y cigüeñal)



Vista superior del cigüeñal de motor Keeway



Vista lateral del cigüeñal



Vista de agujeros para alivianar el cigüeñal

Cigüeñal y biela utilizados para realizar el análisis cinemático del motor.

Anexo 5. Ficha técnica de la motocicleta KEEWAY

DORADO 250

DESIGN Benelli

CRUISING SPIRIT

FICHA TÉCNICA

Longitud	2280 mm.
Ancho	900 mm.
Altura	1110 mm.
Caja de cambios	5 velocidades cadena
Peso Neto	170 kg.
Motor	250cc/4 tiempos
Diámetro por carrera	49 mm X 66 mm.
Compresión	9.4:1
Freno Delantero	Disco
Freno Trasero	Disco
Neumático Delantero	110/90-16
Neumático Posterior	120/90-16
Capacidad de combustible	13.5 lt.
Sistema de Arranque	Eléctrico
Tipo de Embrague	Multi disco húmedo
Sistema de Combustible	EFI

Colores:  NEGRO/CREMA NEGRO/NARANJA

- Freno de disco en cada rueda.
- Tablero custom.
- Motor en "V" Fuel Injection.
- Espaciosas alforjas de piel.

DORADO
KEEWAY MÉXICO

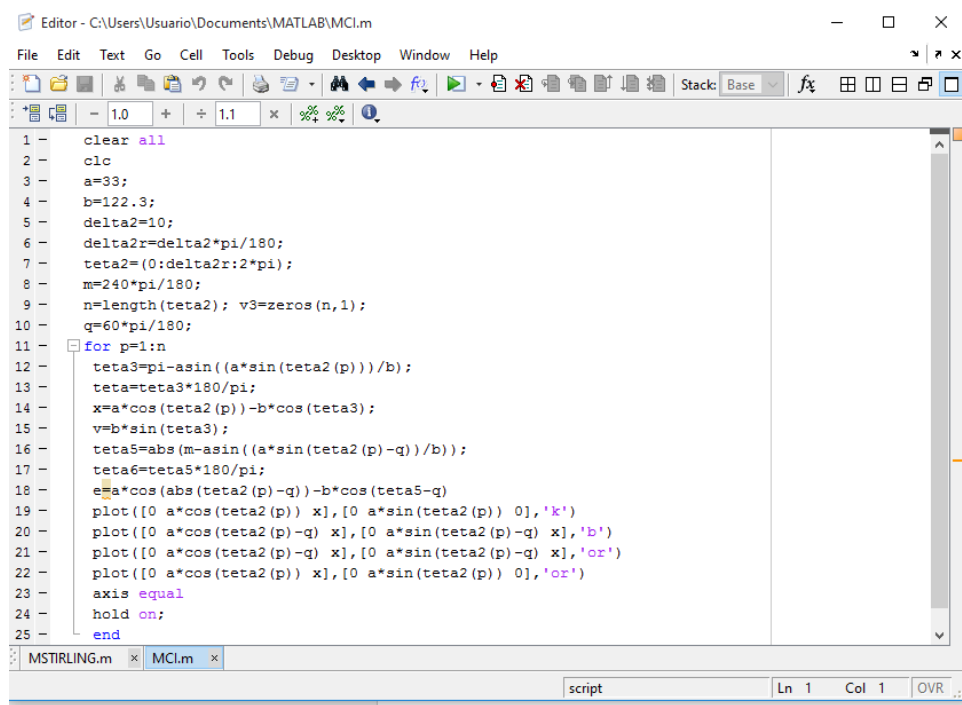
www.keeway.mx
01 800 908 08 08

CRUISING SPIRIT

Siéntete libre y escapa en esta elegante máquina que te inspirará a romper límites. Con una imponente estética clásica, un poderoso motor Fuel Injection hambriento de kilómetros, sus componentes soberbiamente cromados y la absoluta calidad en todos sus detalles la pregunta es ¿estás preparado para ser el centro de atención?

KEEWAY

Anexo 6. Script realizado en Matlab (DEMO) para análisis de posición del motor de combustión interna. Primera opción.

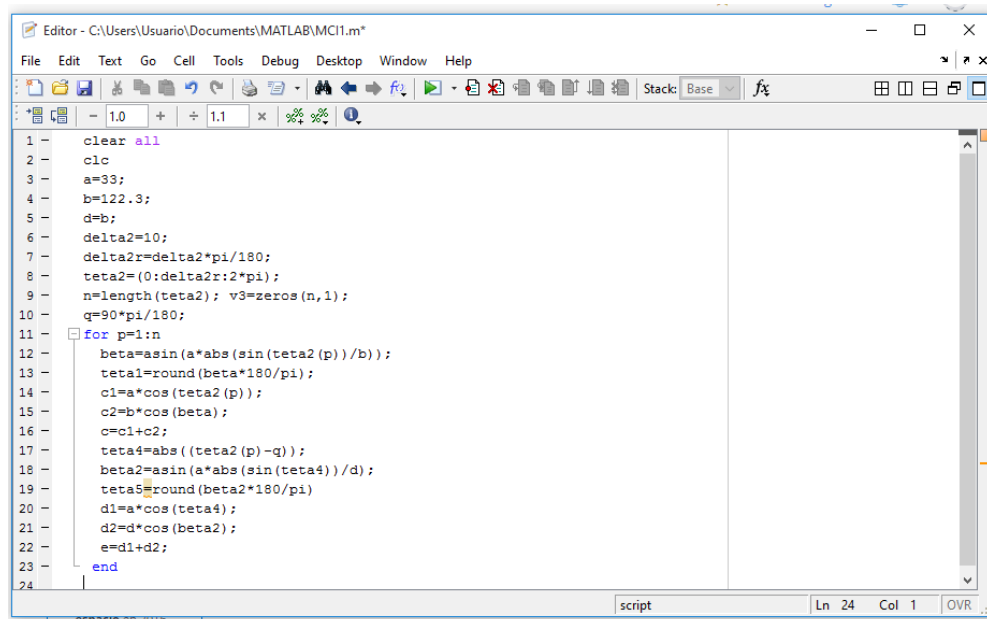


```

1 - clear all
2 - clc
3 - a=33;
4 - b=122.3;
5 - delta2=10;
6 - delta2r=delta2*pi/180;
7 - teta2=(0:delta2r:2*pi);
8 - m=240*pi/180;
9 - n=length(teta2); v3=zeros(n,1);
10 - q=60*pi/180;
11 - for p=1:n
12 -     teta3=pi-asin((a*sin(teta2(p)))/b);
13 -     teta=teta3*180/pi;
14 -     x=a*cos(teta2(p))-b*cos(teta3);
15 -     v=b*sin(teta3);
16 -     teta5=abs(m-asin((a*sin(teta2(p)-q)/b)));
17 -     teta6=teta5*180/pi;
18 -     e=a*cos(abs(teta2(p)-q))-b*cos(teta5-q)
19 -     plot([0 a*cos(teta2(p)) x],[0 a*sin(teta2(p)) 0],'k')
20 -     plot([0 a*cos(teta2(p)-q) x],[0 a*sin(teta2(p)-q) x],'b')
21 -     plot([0 a*cos(teta2(p)-q) x],[0 a*sin(teta2(p)-q) x],'or')
22 -     plot([0 a*cos(teta2(p)) x],[0 a*sin(teta2(p)) 0],'or')
23 -     axis equal
24 -     hold on;
25 - end

```

Anexo 7. Script realizado en Matlab (DEMO) para análisis de posición del motor de combustión interna. Segunda opción.

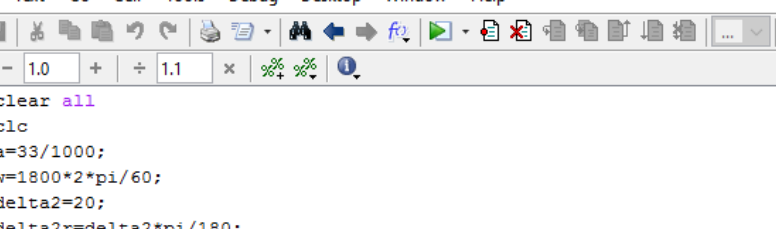


```

1 - clear all
2 - clc
3 - a=33;
4 - b=122.3;
5 - d=b;
6 - delta2=10;
7 - delta2r=delta2*pi/180;
8 - teta2=(0:delta2r:2*pi);
9 - n=length(teta2); v3=zeros(n,1);
10 - q=90*pi/180;
11 - for p=1:n
12 -     beta=asin(a*abs(sin(teta2(p)))/b);
13 -     teta1=round(beta*180/pi);
14 -     c1=a*cos(teta2(p));
15 -     c2=b*cos(beta);
16 -     c=c1+c2;
17 -     teta4=abs((teta2(p)-q));
18 -     beta2=asin(a*abs(sin(teta4))/d);
19 -     teta5=round(beta2*180/pi);
20 -     d1=a*cos(teta4);
21 -     d2=d*cos(beta2);
22 -     e=d1+d2;
23 - end
24 -


```

Anexo 8. Script realizado en Matlab (DEMO) para análisis de velocidad del motor de combustión interna en el punto “A”.



```
1 - clear all
2 - clc
3 - a=33/1000;
4 - w=1800*2*pi/60;
5 - delta2=20;
6 - delta2r=delta2*pi/180;
7 - teta2=(0:delta2r:2*pi);
8 - n=length(teta2); v3=zeros(n,1);
9 - for p=1:n
10 -     vax=-a*w*sin(teta2);
11 -     vay=-a*w*cos(teta2);
12 -     var=sqrt((vax.^2)+(vay.^2))
13 -     plot(teta2, var, 'r')
14 -     ylabel('VELOCIDAD DE A [m/s]')
15 -     xlabel('ANGULO DE GIRO [rad]')
16 -     grid on
17 - end
```


Anexo 9. Script realizado en Matlab (DEMO) para análisis de velocidad en el eje X y Y del motor de combustión interna en el punto “B”.



The screenshot shows the MATLAB Editor window with the following script content:

```
1 - clear all
2 - clc
3 - a=33/1000;
4 - b=122.3/1000;
5 - w=1800*2*pi/60;
6 - delta2=20;
7 - delta2r=delta2*pi/180;
8 - teta2=(0:delta2r:2*pi);
9 - n=length(teta2); v3=zeros(n,1);
10 - for p=1:n
11 -     vby=-b*(a/b)*w*cos(teta2);
12 -     plot(teta2, vby,'g')
13 -     ylabel('VELOCIDAD DEL PISTON By [m/s]')
14 -     xlabel('ANGULO DE GIRO [rad]')
15 -     grid on
16 - end
```

The status bar at the bottom indicates the current position is Line 1, Column 1, and the file is named 'script'.

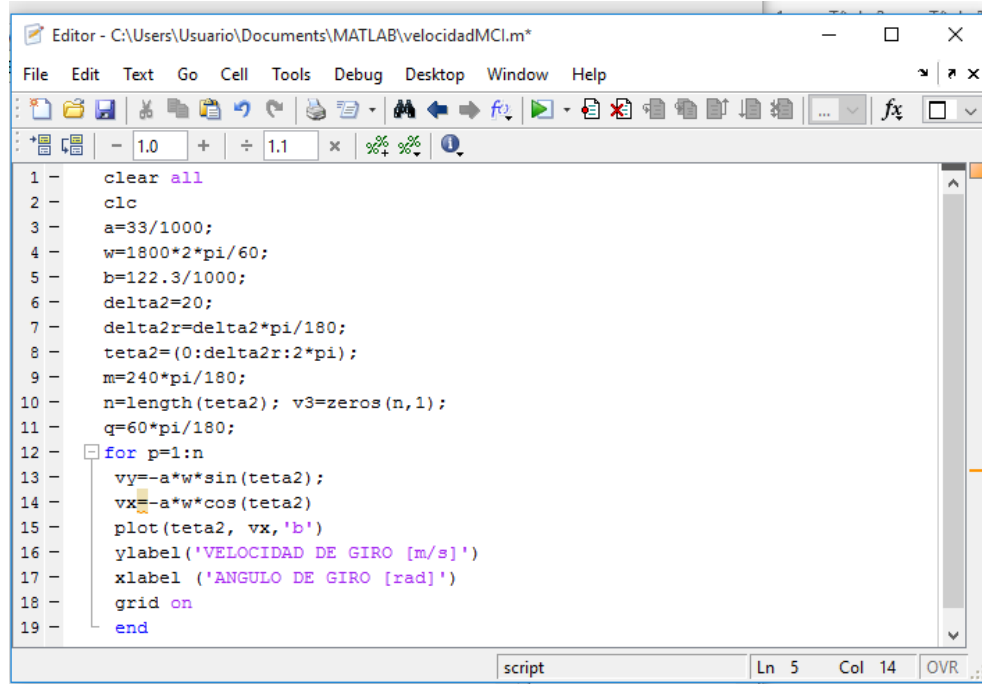


The screenshot shows the MATLAB Editor window with the following script:

```
1 - clear all
2 - clc
3 - a=33/1000;
4 - b=122.3/1000;
5 - w=(1800*2*pi)/60;
6 - delta2=20;
7 - delta2r=delta2*pi/180;
8 - teta2=(0:delta2r:2*pi);
9 - n=length(teta2); v3=zeros(n,1);
10 - for p=1:n
11 -     beta=asin(a*sin(teta2(p))/b);
12 -     vbx=-a*w*(sin(teta2+beta)/cos(beta));
13 -     plot(teta2, vbx,'g')
14 -     ylabel('VELOCIDAD DEL PISTON Bx [m/s]')
15 -     xlabel('ANGULO DE GIRO [rad]')
16 -     grid on
17 - end
18
```

The status bar at the bottom indicates the current position is at line 1, column 1, and the file is named 'script'.

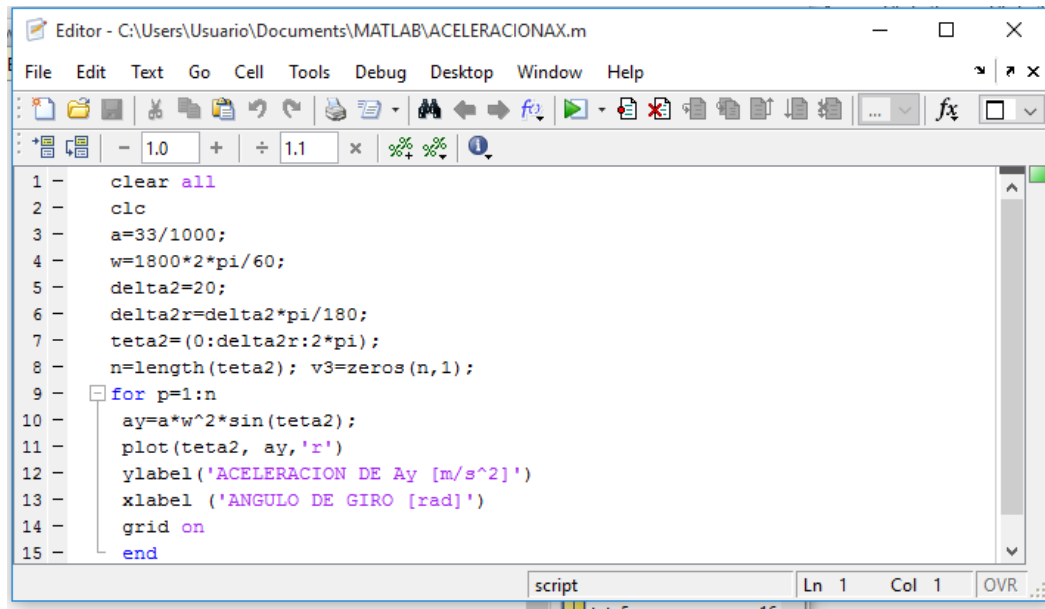
Anexo 10. Script realizado en Matlab (DEMO) para análisis de velocidad del motor de combustión interna en el punto “C”.



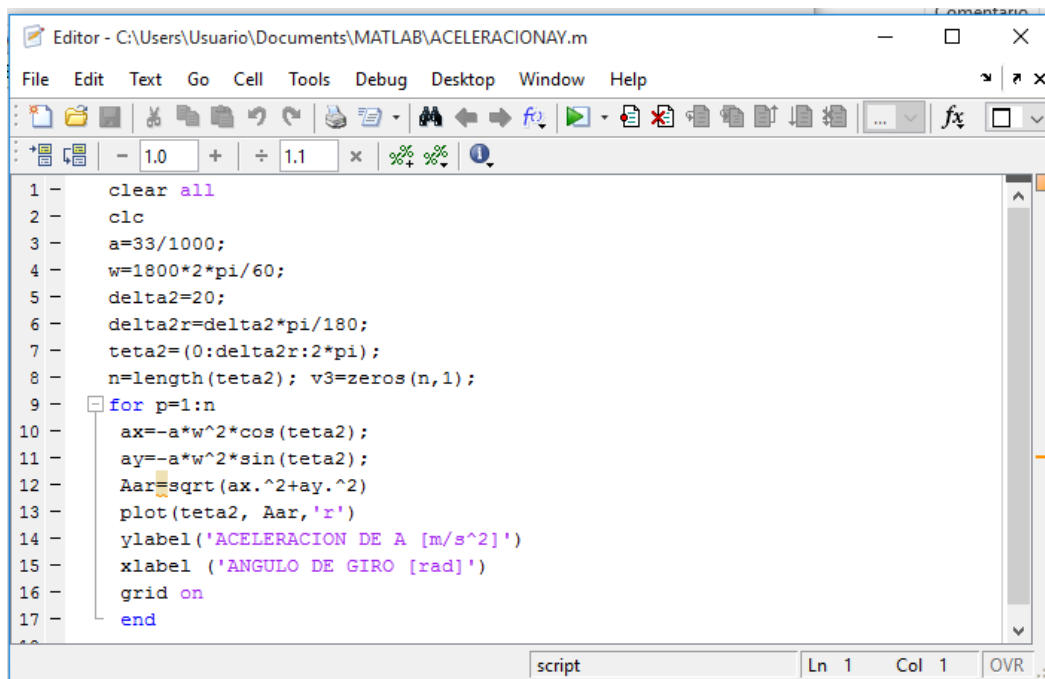
```
1 - clear all
2 - clc
3 - a=33/1000;
4 - w=1800*2*pi/60;
5 - b=122.3/1000;
6 - delta2=20;
7 - delta2r=delta2*pi/180;
8 - teta2=(0:delta2r:2*pi);
9 - m=240*pi/180;
10 - n=length(teta2); v3=zeros(n,1);
11 - q=60*pi/180;
12 - for p=1:n
13 -     vy=-a*w*sin(teta2);
14 -     vx=-a*w*cos(teta2)
15 -     plot(teta2, vx,'b')
16 -     ylabel('VELOCIDAD DE GIRO [m/s]')
17 -     xlabel ('ANGULO DE GIRO [rad]')
18 -     grid on
19 - end
```

The screenshot shows a MATLAB script editor window titled "Editor - C:\Users\Usuario\Documents\MATLAB\velocidadMCI.m*". The script contains 19 lines of code. Lines 1-11 initialize variables: 'a' (33/1000), 'w' (1800*2*pi/60), 'b' (122.3/1000), 'delta2' (20), 'delta2r' (delta2*pi/180), 'teta2' (0:delta2r:2*pi), 'm' (240*pi/180), 'n' (length(teta2)), 'v3' (zeros(n,1)), and 'q' (60*pi/180). Lines 12-19 are a for loop from p=1 to n. Inside the loop, line 13 calculates 'vy' as -a*w*sin(teta2), line 14 calculates 'vx' as -a*w*cos(teta2), line 15 plots 'teta2' vs 'vx' with blue markers ('b'), line 16 sets the y-axis label to 'VELOCIDAD DE GIRO [m/s]', line 17 sets the x-axis label to 'ANGULO DE GIRO [rad]', line 18 turns the grid on, and line 19 ends the loop. The status bar at the bottom indicates "script", "Ln 5", "Col 14", and "OVR".


Anexo 11. Script realizado en Matlab (DEMO) para análisis de aceleración del motor de combustión interna en el punto “A” en el eje X y Y.



```
1 - clear all
2 - clc
3 - a=33/1000;
4 - w=1800*2*pi/60;
5 - delta2=20;
6 - delta2r=delta2*pi/180;
7 - teta2=(0:delta2r:2*pi);
8 - n=length(teta2); v3=zeros(n,1);
9 - for p=1:n
10 -     ay=a*w^2*sin(teta2);
11 -     plot(teta2, ay, 'r')
12 -     ylabel('ACELERACION DE Ay [m/s^2]')
13 -     xlabel ('ANGULO DE GIRO [rad]')
14 -     grid on
15 - end
```



```
1 - clear all
2 - clc
3 - a=33/1000;
4 - w=1800*2*pi/60;
5 - delta2=20;
6 - delta2r=delta2*pi/180;
7 - teta2=(0:delta2r:2*pi);
8 - n=length(teta2); v3=zeros(n,1);
9 - for p=1:n
10 -     ax=-a*w^2*cos(teta2);
11 -     ay=-a*w^2*sin(teta2);
12 -     Aar=sqrt(ax.^2+ay.^2)
13 -     plot(teta2, Aar, 'r')
14 -     ylabel('ACELERACION DE A [m/s^2]')
15 -     xlabel ('ANGULO DE GIRO [rad]')
16 -     grid on
17 - end
```




The screenshot shows the MATLAB Editor window with the following script:

```
1 - clear all
2 - clc
3 - a=33/1000;
4 - b=122.3/1000;
5 - w=1800*2*pi/60;
6 - delta2=20;
7 - delta2r=delta2*pi/180;
8 - teta2=(0:delta2r:2*pi);
9 - n=length(teta2); v3=zeros(n,1);
10 - for p=1:n
11 -     beta=asin(a*sin(teta2(p))/b);
12 -     abx=-a*w^2*((cos(teta2+beta)/cos(beta))+(a*cos(teta2).^2/b*cos(beta).^3));
13 -     plot(teta2, abx,'g')
14 -     ylabel('ACELERACIÓN DEL PISTON Bx [m/s^2]')
15 -     xlabel('ANGULO DE GIRO [rad]')
16 -     grid on
17 - end
```

The status bar at the bottom indicates the current position is Ln 1, Col 1, and the file is named 'script'.

Anexo 13. Script realizado en Matlab (DEMO) para análisis de aceleración del motor de combustión interna en el punto “C” en el eje X y Y.



The screenshot shows the MATLAB Editor interface. The title bar reads "Editor - C:\Users\Usuario\Documents\MATLAB\ACELERACIONCY.m". The menu bar includes File, Edit, Text, Go, Cell, Tools, Debug, Desktop, Window, and Help. The toolbar contains various icons for file operations, editing, and execution. The script editor displays the following code:

```
1 - clear all
2 - clc
3 - a=33/1000;
4 - c=122.3/1000;
5 - w=1800*2*pi/60;
6 - delta2=20;
7 - delta2r=delta2*pi/180;
8 - teta2=(0:delta2r:2*pi);
9 - n=length(teta2); v3=zeros(n,1);
10 - q=60*pi/180;
11 - for p=1:n
12 -     teta4=abs(60-teta2);
13 -     teta5=asin(a*sin(teta2(p)-q)/c);
14 -     acx=-a*w^2*((cos(teta4+teta5)/cos(teta5))+((a/c)*(cos(teta4).^2/cos(teta5)
15 -     plot(teta2, acx,'g')
16 -     ylabel('ACELERACIÓN DEL PISTON Cx [m/s^2]')
17 -     xlabel('ANGULO DE GIRO [rad]')
18 -     grid on
19 - end
```

The status bar at the bottom indicates "script", "Ln 1", "Col 1", and "OVR".

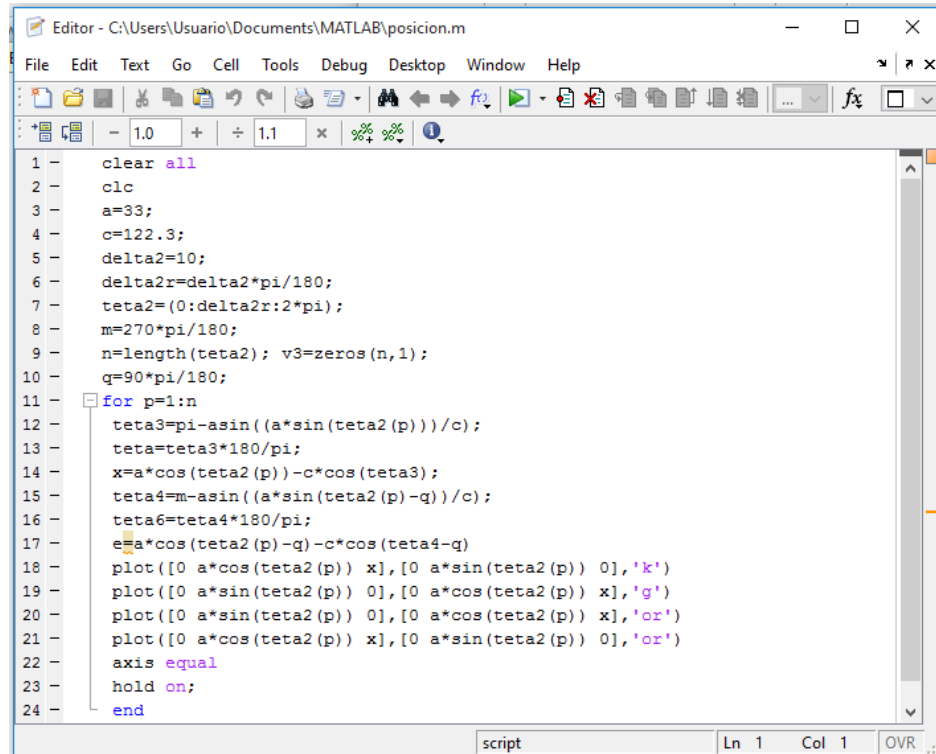
Editor - C:\Users\Usuario\Documents\MATLAB\ACVELERACIONCX.m

File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help

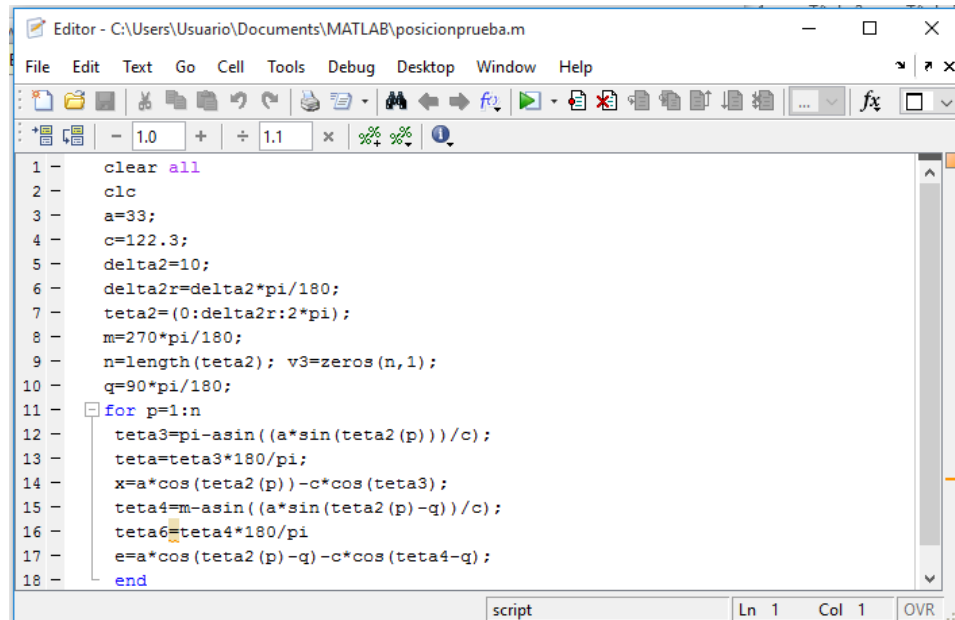
1 - clear all
 2 - clc
 3 - a=33/1000;
 4 - c=122.3/1000;
 5 - w=1800*2*pi/60;
 6 - delta2=1;
 7 - delta2r=delta2*pi/180;
 8 - teta2=(0:delta2r:2*pi);
 9 - n=length(teta2); v3=zeros(n,1);
 10 - q=60*pi/180;
 11 - for p=1:n
 12 - teta4=abs(60-teta2);
 13 - teta5=asin(a*sin(teta2(p)-q)/c);
 14 - acy=c*(a/c)*w^2*sin(teta4);
 15 - acx=-a*w^2*((cos(teta4+teta5)/cos(teta5))+((a/c)*(cos(teta4).^2/cos(teta5)
 16 - acr=sqrt(acx.^2+acy.^2)
 17 - plot(teta2, acr,'g')
 18 - ylabel('ACELERACIÓN DEL PISTON C [m/s^2]')
 19 - xlabel('ANGULO DE GIRO [rad]')
 20 - grid on
 21 - end

script Ln 1 Col 1 OVR

Anexo 14. Script realizado en Matlab (DEMO) para análisis de posición del motor Stirling tipo alfa.

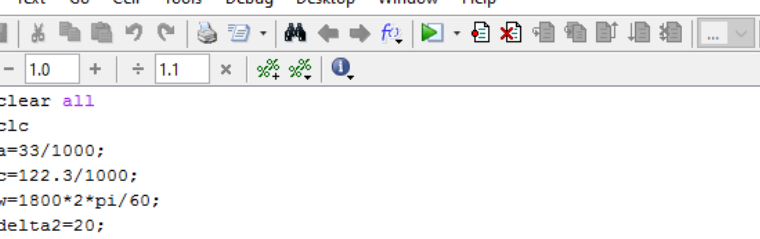


```
1 - clear all
2 - clc
3 - a=33;
4 - c=122.3;
5 - delta2=10;
6 - delta2r=delta2*pi/180;
7 - teta2=(0:delta2r:2*pi);
8 - m=270*pi/180;
9 - n=length(teta2); v3=zeros(n,1);
10 - q=90*pi/180;
11 - for p=1:n
12 -     teta3=pi-asin((a*sin(teta2(p)))/c);
13 -     teta=teta3*180/pi;
14 -     x=a*cos(teta2(p))-c*cos(teta3);
15 -     teta4=m-asin((a*sin(teta2(p)-q))/c);
16 -     teta6=teta4*180/pi;
17 -     e=a*cos(teta2(p)-q)-c*cos(teta4-q)
18 -     plot([0 a*cos(teta2(p)) x],[0 a*sin(teta2(p)) 0],'k')
19 -     plot([0 a*sin(teta2(p)) 0],[0 a*cos(teta2(p)) x],'g')
20 -     plot([0 a*sin(teta2(p)) 0],[0 a*cos(teta2(p)) x],'or')
21 -     plot([0 a*cos(teta2(p)) x],[0 a*sin(teta2(p)) 0],'or')
22 -     axis equal
23 -     hold on;
24 - end
```



```
1 - clear all
2 - clc
3 - a=33;
4 - c=122.3;
5 - delta2=10;
6 - delta2r=delta2*pi/180;
7 - teta2=(0:delta2r:2*pi);
8 - m=270*pi/180;
9 - n=length(teta2); v3=zeros(n,1);
10 - q=90*pi/180;
11 - for p=1:n
12 -     teta3=pi-asin((a*sin(teta2(p)))/c);
13 -     teta=teta3*180/pi;
14 -     x=a*cos(teta2(p))-c*cos(teta3);
15 -     teta4=m-asin((a*sin(teta2(p)-q))/c);
16 -     teta6=teta4*180/pi
17 -     e=a*cos(teta2(p)-q)-c*cos(teta4-q);
18 - end
```


Anexo 15. Script realizado en Matlab (DEMO) para análisis de velocidad del motor Stirling tipo alfa en el punto “C”.



```
Editor - C:\Users\Usuario\Documents\MATLAB\VELOCIDADSTIRLINGCX.m


File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help

+ - 1.0 + ÷ 1.1 × % % ⓘ

1 - clear all
2 - clc
3 - a=33/1000;
4 - c=122.3/1000;
5 - w=1800*2*pi/60;
6 - delta2=20;
7 - delta2r=delta2*pi/180;
8 - teta2=(0:delta2r:2*pi);
9 - n=length(teta2); v3=zeros(n,1);
10 - for p=1:n
11 -     teta4=abs(90-teta2);
12 -     teta5=asin(a*sin(teta4(p))/c);
13 -     vcy=-a*w*sin(teta4+teta5)/cos(teta5);
14 -     plot(teta2, vcy,'r')
15 -     ylabel('VELOCIDAD DE Cy [m/s]')
16 -     xlabel('ANGULO DE GIRO [rad]')
17 -     grid on
18 - end

script Ln 1 Col 1 OVR
```

Anexo 16. Script realizado en Matlab (DEMO) para análisis de aceleración del motor Stirling tipo alfa en el punto “C”.



The screenshot shows the MATLAB Editor window with the following script:

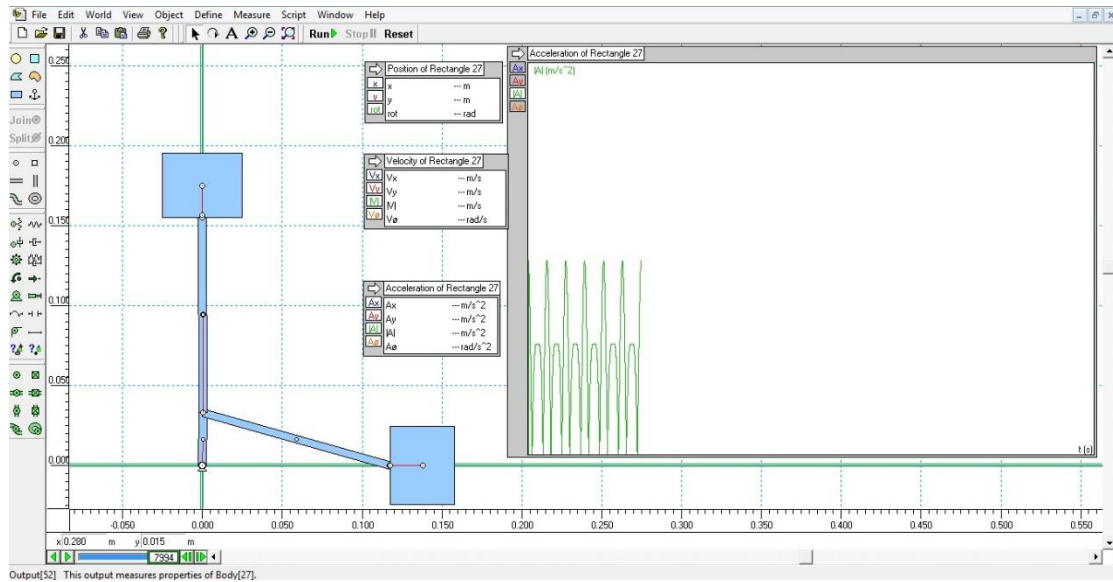
```

1 - clear all
2 - clc
3 - a=33/1000;
4 - c=122.3/1000;
5 - w=1800*2*pi/60;
6 - delta2=20;
7 - q=90*pi/180;
8 - delta2r=delta2*pi/180;
9 - teta2=(0:delta2r:2*pi);
10 - n=length(teta2); v3=zeros(n,1);
11 - for p=1:n
12 -     teta4=90-teta2;
13 -     teta5=asin(a*sin(teta4(p))/c);
14 -     acy=-c*w^2*((cos(teta4+teta5)/cos(teta5)+(a*cos(teta4).^2/c*cos(cos(teta5)
15 -     plot(teta2, acy,'r')
16 -     ylabel('ACELERACION DE Cy [m/s^2]')
17 -     xlabel('ANGULO DE GIRO [rad]')
18 -     grid on
19 - end

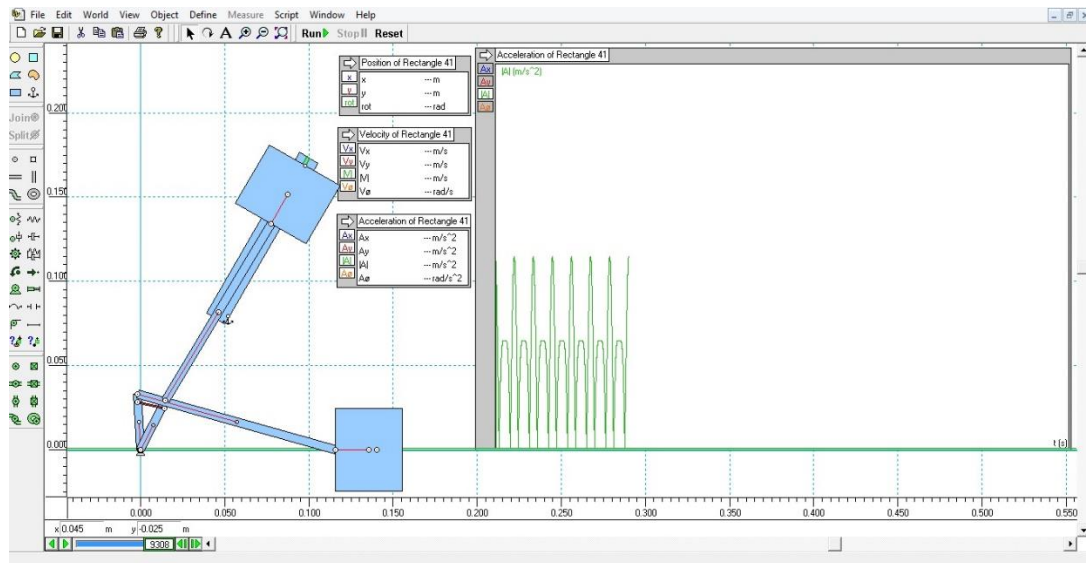
```

The script calculates the acceleration a_y as a function of the angle $teta2$ and plots it. The plot is a red line with markers. The x-axis is labeled 'ANGULO DE GIRO [rad]' and the y-axis is labeled 'ACELERACION DE Cy [m/s^2]'. A grid is enabled.

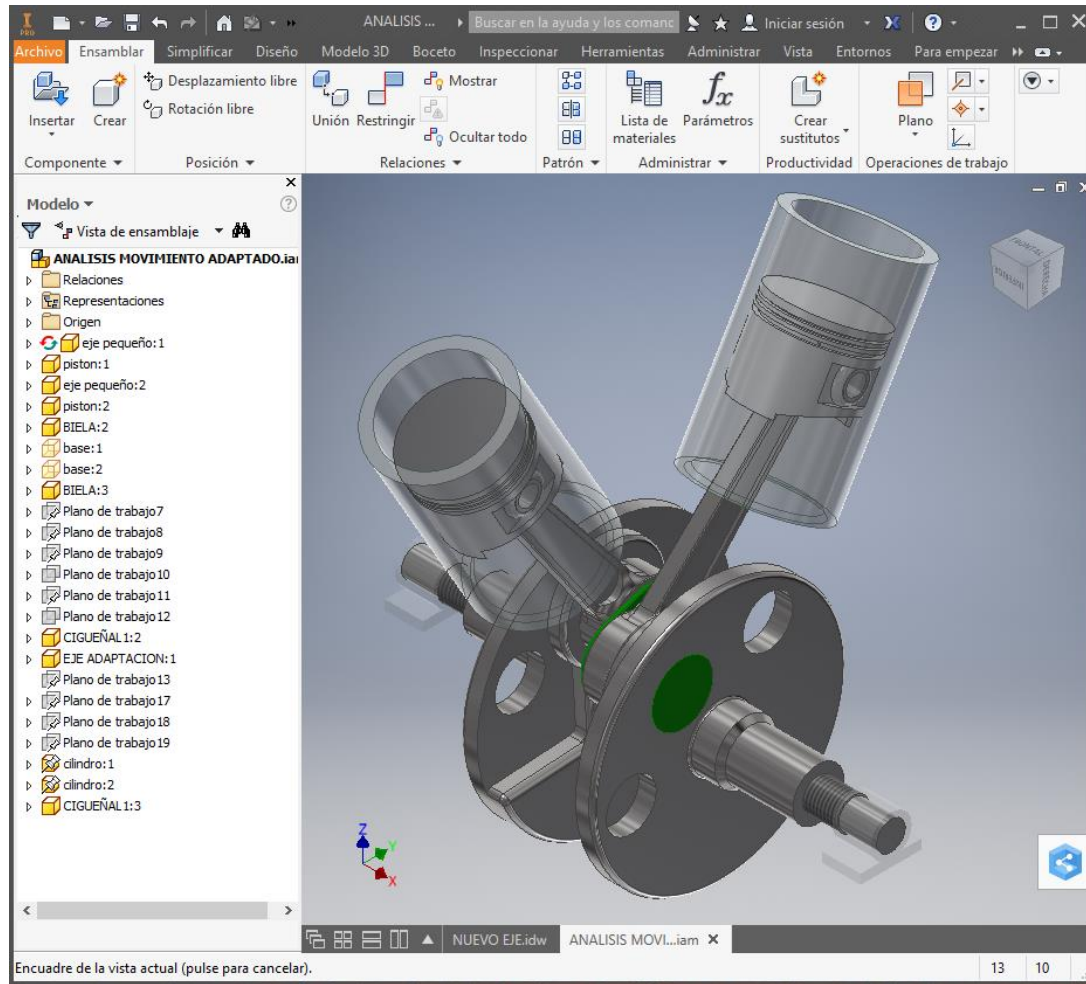
Anexo 17. Script realizado en Working Model (DEMO) del motor Stirling tipo alfa para realizar el análisis cinemático.



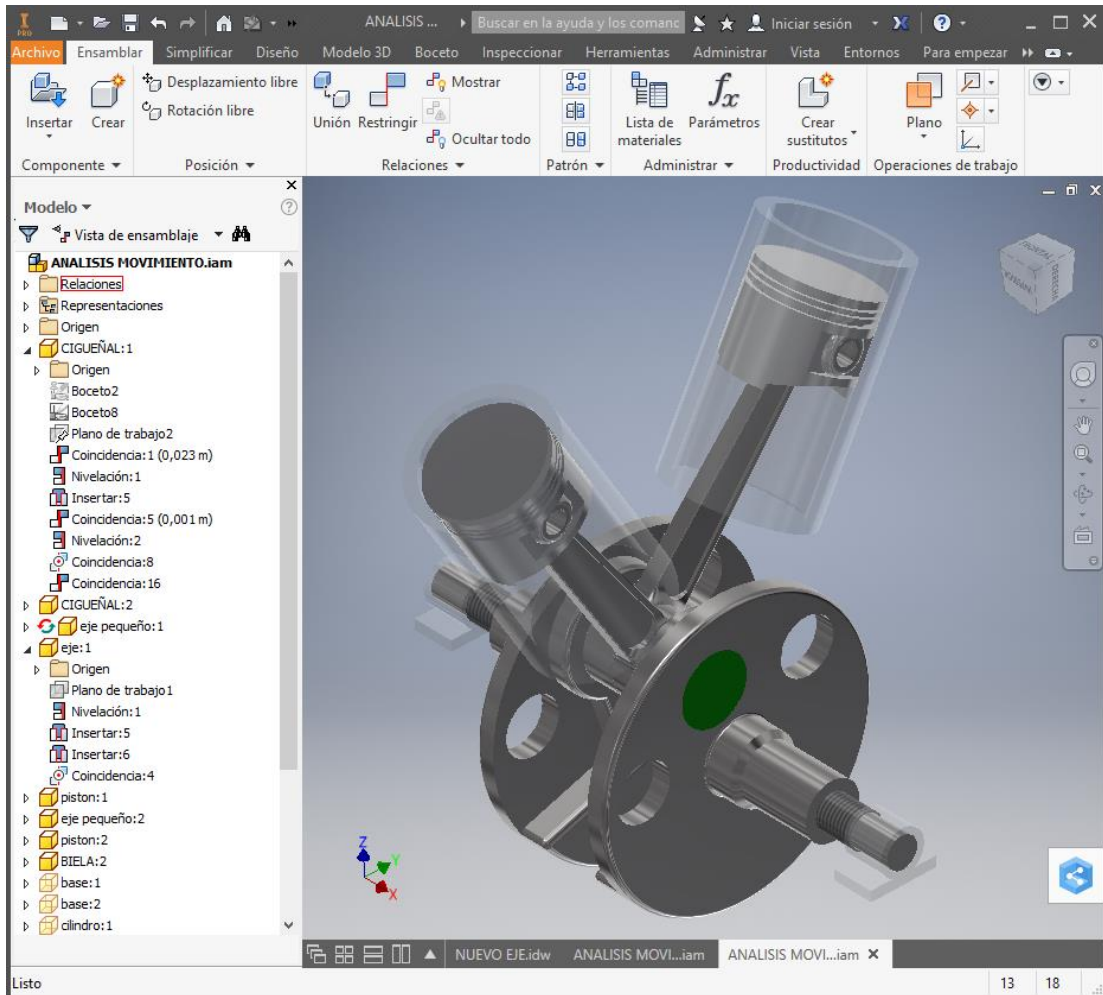
Anexo 18. Script realizado en Working Model (DEMO) del motor de combustión interna con la compensación realizada para corregir el retraso del pistón C. Para análisis cinemático.



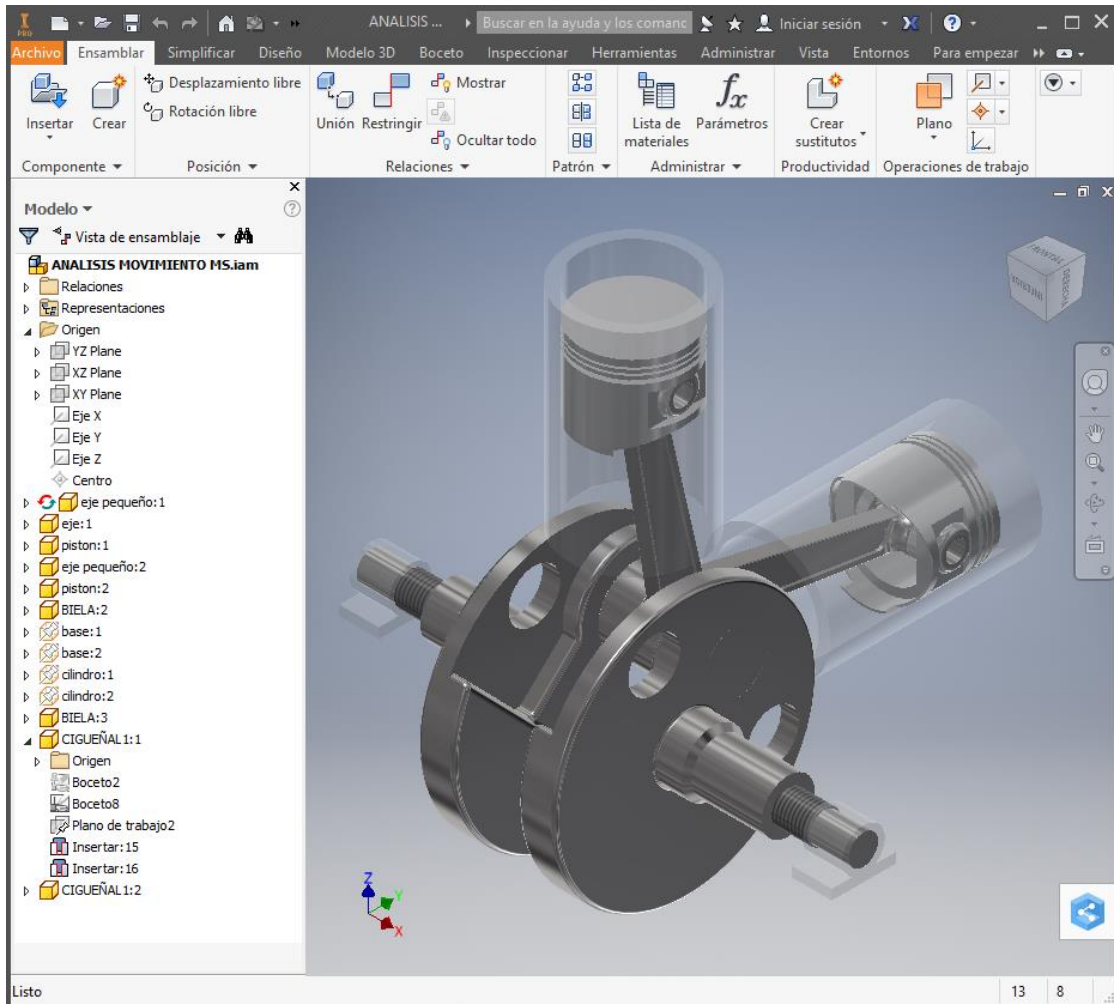
Anexo 19. Vista en conjunto del motor de motocicleta con el eje de adaptación diseñado en Inventor profesional (DEMO)



Anexo 19, continuación motor de combustión interna de motocicleta con pistones a 60
grados



Anexo 19, continuación motor Stirling tipo alfa con pistones a 90 grados



Anexo 20. CD que contiene las simulaciones dinámicas en el programa Inventor profesional (DEMO) y Working model (DEMO)

La carpeta SIMULACION CINEMATICA EN INVENTOR Contiene:

- Archivo (ANÁLISIS MOVIMIENTO ADAPTADO.iam): Simulación cinemática del conjunto diseñado del motor de combustión con el eje de adaptación para el muñón de la biela.
- Archivo (ANÁLISIS MOVIMIENTO MCI.iam): Simulación cinemática del conjunto diseñado del motor de combustión interna.
- Archivo (ANÁLISIS MOVIMIENTO MS.iam): Simulación cinemática del conjunto diseñado del motor Stirling tipo alfa.

La carpeta SIMULACIÓN CINEMÁTICA EN WORKING MODEL contiene:

- Archivo (ANÁLISIS MOVIMIENTO ADAPTADO.wm2d): Simulación cinemática del conjunto diseñado del motor de combustión con el eje de adaptación para el muñón de la biela.
- Archivo (ANÁLISIS MOVIMIENTO MCI.wm2d): Simulación cinemática del conjunto diseñado del motor de combustión interna.
- Archivo (ANÁLISIS MOVIMIENTO MS.wm2d): Simulación cinemática del conjunto diseñado del motor Stirling tipo alfa.

Anexo 21. Planos